i. 1922.

By A. R. FLORIAN.

Grammar of Modern French. 3s. 6d.

Elementary French Grammar. 2s. 6d.

French Exercises. 3s.

French Prose Composition. 3s.

A First French Course. 3s. 6d.
The First Twenty-eight Lessons and their Special Vocabularies Phonetically Transcribed. 1s. 6d.

A Second French Course. 3s.

French Grammatical Readers

Series A. With Vocabularies. 2s. 6d. each.
Le Blocus, par ERCKMANN-CHATRIAN. L'Evasion d'Edmond Dantès, par DUMAS. L'Homme à l'Oreille Cassée, par ABOUT.

Series B. With or without Vocabularies, 2s. 6d. each.
Nouvelles Genevoises, par TÖPFFER. Le Capitaine Pamphile, par DUMAS. Contes Choisis.

Passages for Translation into French. Junior, 1s. 6d. Senior, 2s.

French Unseens. Junior, 1s. 6d.

French Unseens. Senior, 1s. 9d.

By S. E. LONGLAND.

French Unseens.
Junior—2 books. 8d. each.
Senior—2 books. 10d. each.

A French Grammar for higher classes of Schools and for Colleges.
By F. V. MASSARD and C. DURNO. 4s.

By F. V. MASSARD.

A French Exercise Book.
A companion volume to above. 2s. 6d.

Elementary French Composition—Direct Method. 3s.

A French Composition Book—Direct Method. 3s.

Direct Method French Readers

Junior Series:—With Vocabularies. 2s. 6d. each. La Mare au Diable, par G. SAND. Quatre Contes, par MÉRIMÉE. Lettres de mon Moulin, par DAUDET. Deux Nouvelles: Pierre et Camille, et Croisilles, par ALFRED DE MUSSET.

Senior Series:—No Vocabularies. 3s. each. Bug-Jargal, par HUGO. Pêcheur d'Islande, par LOTI. Colomba, par MÉRIMÉE. Le Roi des Montagnes, par EDMOND ABOUT.

By A. R. FLORIAN.

First Book of German Oral Teaching on the Direct Method. 4s. 6d.

German Unseens. 3s. 6d.

A Primer of German Grammar.
By SOMERVILLE and BYRNE. 3s.

Primary German Exercises, 3s., and A First German Writer, 4s.
By the same Authors.

German Prose Composition.
By R. J. MORICH. 5s.

German Texts:—
Beginners'. 5 Vols. 1s. each.
Elementary. 5 Vols. 1s. 3d. each.

Edited by D. L. SAVORY. 2s. 6d. each Vol.

EASY GERMAN TEXTS.

GERSTAECKER'S Germelshausen.
HAUFF'S Die Errettung Fatmes.
RIEHL'S Die 14 Nothelfer.
RIEHL'S Der Stadtpfeifer.
ZEDELIUS'S Geleite die drauszen sind.

ELEMENTARY GERMAN TEXTS.

MARIE VON EBNER-ESCHENBACH'S Krambambuli.
GERSTAECKER'S John Wells.
HAUFF'S Das Gespensterschiff.
MUELLENBACH'S Johannissegen.
RIEHL'S Der Dachs auf Lichtmess.
SEIDEL'S Die Geschichte des Jungen Herrn Anton.

English Grammar and Composition. By G. A. TWENTYMAN.
Part I. First Year's Course. 1s. 6d.
Part II. Second Year's Course. 2s.
Part III. Middle School Composition. 3s.

Macaulay's Lays of Ancient Rome.
With Historical Introduction.
By W. EDWARDS. 2s. 6d.

Notes on English Literature.
Skelton to Shakespeare.
By W. EDWARDS. 3s.

English Classics for Schools

Grade I. 1s. each.

1. Scott's Kenilworth.* 2. Scott's Talisman.* 3. Wordsworth's Shorter Poems.

Grade II.

1. Anson's Voyage Round the World.* 1s. 9d. 2. Cook's Voyages.* 1s. 3. Longfellow's Evangeline. 1s. 4. Prescott's Conquest of Mexico.* 2s.

Grade III.

1. Burke on the French Revolution.* 1s. 6d. 2. Burke on America. 1s. 9d.

* The text of these books is reduced.

LECTURES SCIENTIFIQUES

A FRENCH READER FOR SCIENCE STUDENTS

Containing Extracts
from Modern French Scientific Works
in Chemistry, Physics, Mathematics,
Physiology and Botany
with a Glossary of Technical Terms

BY

W. G. HARTOG, B.A.

LECTURER IN FRENCH
AT UNIVERSITY COLLEGE, LONDON

SECOND EDITION

RIVINGTONS
34 *KING STREET, COVENT GARDEN*
LONDON
1906

PREFACE

THE necessity for a book of this kind has been emphasised by the action of the University of London in insisting that candidates for a degree in Science shall be able to read and understand French and German Scientific work. As a consequence of this regulation I have been lecturing during the last two sessions to Science students on French Science, and found it difficult and expensive to obtain sufficient variety of material to keep them employed during the academic year. This book has therefore been primarily compiled for the use of students who need to have a fair knowledge of scientific French for their degrees.

It should, however, appeal to a fairly wide public, as, quite apart from academic distinctions, it is nowadays impossible to obtain thorough scientific knowledge without reading, as it appears, the work of those nations that hold a high place in the world of science; and France is admittedly a leader in discovery, research, and scientific literature.

To have treated the whole of the subjects that come within the scope of the term 'Natural Science,' would have swelled this little book overmuch. I have therefore confined myself herein to Physics, Chemistry, Mathematics, Physiology, and Botany.

The Glossary is limited to words which do not occur as a rule in a good French-English dictionary, or which occur in a technical sense. Terms such as *atomique*, *métallique*, *phénomène*, which are practically the same in English as in French and present no difficulty to the student have been purposely omitted. Where necessary, entire phrases have been translated and reference to the context has been given. Feeling as I do that this part

of the book is of great importance, and being also very conscious of its many shortcomings, some of which are almost inevitable at the first attempt, I shall be very grateful for corrections and suggestions for its improvement in a second edition.

My sincere thanks are due first of all to Professor Sir William Ramsay, K.C.B., for his untiring help and kindness, without which I should have found it difficult to produce this book; and, for assistance in the rendering of technical terms, to my colleagues Professors J. Norman Collie, F.R.S., and E. C. C. Baly, and Dr. S. Smiles, in Chemistry; to Professor Trouton, F.R.S., and Professor Cormack, in Physics; to Professor M. J. M. Hill, F.R.S., and to Mr. H. J. Harris, in Mathematics; to Professor Starling, F.R.S., and Professor E. A. Minchin, in Physiology; to my father, Professor Marcus Hartog, in Botany; and to my uncle, Mr. P. J. Hartog, for various suggestions. I am, however, personally responsible for such inaccuracies as may have escaped notice.

Finally, I must thank the French authors and publishers who have kindly consented to allow me to print extracts from works belonging to them.

W. G. HARTOG.

UNIVERSITY COLLEGE,
LONDON, *June* 23, 1904.

In this edition the text has been carefully revised, and the Glossary has been considerably augmented. My thanks are due to my students who have pointed out omissions and to my father, Professor Marcus Hartog, for many suggestions and emendations.

W. G. H.

June 20, 1906.

TABLE DES MATIÈRES

I. PHYSIQUE

PAGE

A. Dynamique (Boutan et d'Almeida, *Cours de Physique*, 1874), . . 1
Chute des Corps, ,, ,, . . 3

B. Hydrostatique, ,, ,, . . 6
Poids Spécifique, ,, ,, . . 10
Baromètre (F. Hoefer, *Histoire de la Physique*), ... 12
Machine Pneumatique (Boutan et d'Almeida), ... 15
L'Aviation de Demain (S. Drzewiecki, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 18

C. Acoustique—
Vitesse du Son (F. Hoefer, *Histoire de la Physique*), . . . 22
Interférences du Son (Boutan et d'Almeida), ... 27
Timbre, ,, ,, ... 32
Mécanisme de l'Oreille, ,, ,, ... 33

D. Chaleur—
Le Thermomètre (F. Hoefer, *Histoire de la Physique*), . . 36
Chaleur Latente, ,, ,, ,, ...
Fusion, Dissolution (Boutan et d'Almeida), ... 47
Transmission de la Chaleur ,, ,, ... 52
Principes de Thermochimie ,, ,, ... 54
Machine à Vapeur ,, ,, ... 56
Thermométrie (Ch.-Ed. Guillaume, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 58
Principe de l'Équivalence (Lippmann, *Cours de Thermodynamique*, 1889), ... 61

E. OPTIQUE— PAGE

Théories de la Lumière (F. Hoefer, *Histoire de la Physique*), . 64

Polarisation ,, ,, ,, . 70

Spectre Solaire (Boutan et d'Almeida), ... 74

Chronophotographie (E. J. Marey, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 79

Photométrie (Ch.-Ed. Guillaume, *Unités et Étalons*, 1901), . 83

F. ÉLECTRICITÉ—

Décharges dans le Vide (Sir William Crookes, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 86

Théorie Électromagnétique de la Lumière (R. Blondlot, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 88

L'Induction Magnétique (J. A. Ewing, F.R.S., *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 90

Moteurs à Courants Alternatifs (E. Hospitalier, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 91

II. CHIMIE

La Reproduction Artificielle des Rubis (A. Verneuil, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 97

La Grande Industrie Chimique (G. Lunge, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 108

Les Équilibres Chimiques (H. le Chatelier et G. Mouret, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 124

Procédés Nouveaux pour le Raffinage de l'Acier (V. Le Verrier, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 151

La Radio-Activité de la Matière (Henri Becquerel, *Le Radium*, 1904), . 169

Le Radium (J. D'Arsonval, *Le Radium*, 1904), ... 178

Dosage de l'Acide Phosphorique (*Agenda du Chimiste*, 1885), . . 182

Réactif de Nessler pour l'Ammoniaque ,, ,, . . . 182

Analyse de la Bière ,, ,, . . . 183

III. PHYSIOLOGIE

Revue Annuelle de Physiologie (Léon Frédéricq, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 187

Les Anesthésiques (R. Dubois, *Revue Générale des Sciences*, 1891), . 210

Le Pancréas (E. Gley, *Revue Générale des Sciences*, 1891), . . . 226

PAGE

IV. MATHÉMATIQUES

Les Géométries non Euclidiennes (H. Poincaré, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 242
Le Problème des Trois Corps (H. Poincaré, *Revue Générale des Sciences*, 1891), ... 255

V. BOTANIQUE

Fleur en général (Le Maout et J. Decaisne, *Traité de Botanique*), . . 266
Calyce ,, ,, ,, . . 269
Corolle ,, ,, ,, . . 272
Androcée ,, ,, ,, . . 274
Pistil ,, ,, ,, . . 278
Symétrie de la Fleur ,, ,, ,, . . 283
Fruit ,, ,, ,, . . 285
Graine ,, ,, ,, . . 291
Tubes Criblés (Marcel Mirande, *Annales de Botanique*, 1900), . . 295
Position du Sac Embryonnaire dans l'Ovule (Mathilde Goldflus, *Annales de Botanique*, 1900), ... 297
Origine des Poils Post-Staminaux chez les Santalacées (Ph. van Tieghem, *Annales de Botanique*, 1900), ... 301
Phénomènes de la Reproduction (Le Maout et Decaisne, *Traité de Botanique*), ... 305
Descriptions florales (Le Maout et Decaisne, *Traité de Botanique*), . 307

GLOSSARY, ... 313

LECTURES SCIENTIFIQUES

I. PHYSIQUE.

A.—DYNAMIQUE.

Influence exercée par la position du centre de gravité dans un corps.—La position du centre de gravité a encore une grande influence sur la nature de l'équilibre. Prenons, par exemple, le cas d'un corps pesant mobile autour d'un axe horizontal, et choisissons, à cause de son importance, l'équilibre du fléau de la balance. Ce fléau, constitué par une barre métallique ayant habituellement la forme indiquée par la figure, est traversé en son milieu, par un prisme d'acier, nommé *couteau*, qui repose, par une arête vive, sur un plan d'acier ou d'agate. Les deux moitiés ou bras du fléau, étant parfaitement symétriques, le 10 centre de gravité se trouve nécessairement dans le plan perpendiculaire à l'axe de figure passant par l'arête du couteau. Trois cas peuvent se présenter : le centre de gravité peut être au-dessus de l'axe de suspension, ou au-dessous, ou enfin coïncider avec l'axe lui-même.

Équilibre instable.—Dans le premier cas, soit A l'axe de suspension, g' le centre de gravité ; pour l'équilibre, il faudra, comme toujours, que la verticale du centre de gravité passe par l'axe ou bien que le fléau soit horizontal. Mais si l'on vient à déranger ce dernier, même d'une petite quantité, de sa position 20 d'équilibre, et à s'incliner suivant M'N', le centre de gravité descendra de g' en g sur l'arc de cercle de rayon g'A, et la force appliquée au centre de gravité entraînera de plus en plus le fléau du côté vers lequel on l'a incliné ; c'est-à-dire que celui-ci abandonnera définitivement sa position initiale pour ne plus la reprendre : l'équilibre primitif était *instable*.

Équilibre indifférent.—Si g' se confond avec A, le centre de

gravité est fixe; le fléau sera donc en équilibre dans toutes les
positions qu'on lui donnera : l'équilibre est *indifférent*.

30 **Équilibre stable.**—Enfin, si le centre de gravité est en G, au-
dessous de A, quand on inclinera le fléau suivant M'N', le centre
de gravité montera de G en G' sur l'arc de cercle de rayon GA,
et l'on voit que le centre de gravité, sollicité par la force qui lui
est appliquée, ramènera nécessairement le fléau dans sa position
initiale; il y reviendra après avoir oscillé pendant quelque
temps, de part et d'autre de cette position. L'équilibre est
stable.

En général, on peut affirmer que l'équilibre d'un système
pesant mobile autour d'un axe, ou celui d'un corps qui, posé sur
40 un plan, ne le touche que par un élément de surface, comme M,
est stable, toutes les fois que son centre de gravité monte pour
le moindre dérangement imprimé au corps. Il est instable
lorsque, dans les mêmes circonstances, le centre de gravité
descend; il est indifférent lorsque le centre de gravité se main-
tient, dans tous les cas, à la même hauteur.

Dans un système quelconque, soumis à des ébranlements, une
voiture, par exemple, traînée sur une route qui n'est ni horizontale
ni plane, la stabilité de l'équilibre est d'autant plus parfaite que
le centre de gravité est placé plus bas. C'est qu'en effet la
50 verticale du centre de gravité tombe en dehors de la base de
sustentation, par une inclinaison de la voiture d'autant plus forte
que le centre de gravité est plus rapproché du sol.

Détermination du centre de gravité.—Lorsqu'un corps est
homogène, et qu'il présente une figure géométrique; ou lorsque,
étant hétérogène, on connaît la loi suivant laquelle varie la den-
sité des diverses parties qui le constituent, on arrive par le calcul
à fixer *à priori* la position de son centre de gravité. On peut
considérer comme évident que tout corps homogène, qui a un
plan de symétrie ou un axe de symétrie, a son centre de gravité
60 dans ce plan ou sur cet axe; que tout corps qui possède un
centre de figure a son centre de gravité coïncidant avec le centre
de figure.

Donc, le centre de gravité d'une ligne droite supposée pesante
sera en son milieu;

Le centre de gravité d'un cercle, en son centre ;

Le centre de gravité d'un parallélogramme, au point de croisement de ses diagonales ;

Le centre de gravité de l'aire d'un triangle, au point de rencontre des médianes, ou au tiers de l'une d'elles à partir de la base ; 70

Le centre de gravité d'une sphère, en son centre de figure ;

Le centre de gravité d'un parallélipipède, au point de concours de ses diagonales.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique*.

1874.

CHUTE DES CORPS.

Tous les corps tombent avec la même vitesse dans le vide.— Le premier fait qui nous frappe dans le mouvement habituel des corps soumis à l'action de la pesanteur, c'est la vitesse différente de leur chute. A égalité de surface, ceux qui ont une moindre masse mettent plus de temps à tomber d'une même hauteur. Ainsi un disque de papier tombe moins vite qu'un disque de métal de même diamètre ; une boule de liège, moins vite qu'une boule de plomb de même volume. Newton a prouvé, le premier, que cette différence dans la vitesse de chute est due à la résistance de l'air. Il suffit, en effet, de faire le vide dans un long 10 tube de verre portant à l'une de ses extrémités un robinet et renfermant des corps de densités très inégales, des barbes de plume, du papier, du liège, du plomb, du fer, pour montrer qu'en retournant brusquement le tube, tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse. Le liège et le plomb, malgré la grande différence qui existe entre leurs densités, s'accompagnent dans tout le parcours du tube, comme s'ils avaient été rendus solidaires l'un de l'autre.

Quelques mots d'explication sont nécessaires : l'expérience précédente nous montrant que la vitesse de chute d'un corps 20 dans le vide est indépendante de sa masse, nous sommes en droit d'admettre qu'un corps est animé, en tombant, d'une vitesse égale à celle que posséderait, aux différentes époques du

mouvement, chacune de ses molécules obéissant isolément à l'action de la pesanteur. Or, si le corps en question, au lieu de cheminer dans le vide, se meut dans un milieu résistant, l'atmosphère, il communique un mouvement à l'air, primitivement en repos, qu'il rencontre sur son passage et éprouve par suite lui-même une certaine perte de vitesse. Cette perte n'est pas la
30 même pour deux corps de même nature, que nous supposerons posséder des surfaces égales, mais de masses différentes : deux sphères de plomb, l'une creuse, l'autre massive. En effet, la force résistante de l'air se répartit entre toutes les molécules de chaque mobile, elle est donc d'autant moindre pour chacune d'elles que le mobile en contient davantage ou que sa masse est plus grande ; c'est dire que la sphère massive de plomb doit tomber plus vite que la sphère creuse. Une inégalité du même genre doit se produire entre des mobiles de même forme, qui différeront à la fois par leur masse et par leur nature. Du
40 reste, la résistance opposée par un fluide au mouvement d'un corps, croît plus rapidement que la vitesse de ce dernier; si bien qu'un mobile qui tomberait dans l'atmosphère d'une hauteur suffisante, prendrait nécessairement un mouvement uniforme avant d'arriver à la surface du sol.

Loi de la chute des corps—Vitesse.—Galilée a fait les premières recherches sur la chute des corps ; et c'est à lui qu'on doit la découverte des lois de la pesanteur. Il se servait à cet effet d'un plan incliné. Aujourd'hui, pour déterminer la relation qui lie l'espace, parcouru par un corps qui tombe, au temps
50 employé à le parcourir, relation qu'on a nommée *loi des espaces*, et celle qui unit la vitesse à la durée de la chute, qu'on a nommée *loi des vitesses*, on a recours à deux appareils qui permettent d'exécuter les mesures dans des conditions meilleures : la machine du physicien anglais Atwood et la machine à indications continues de M. Morin.

Mais, avant tout, il est indispensable de rappeler le sens de ce mot vitesse. Quand un corps est abandonné à lui-même, qu'il est soustrait à l'action des forces qui agissaient sur lui et lui communiquaient un mouvement, il parcourt, en raison
60 de l'inertie de la matière, des espaces égaux dans des temps

égaux, son *mouvement* est dit *uniforme*. La vitesse, dans ce cas, est mesurée par l'espace parcouru par le corps pendant l'unité de temps. Lorsque, au contraire, le corps est soumis à l'action d'une force continue, et que par suite son mouvement est varié, la vitesse, à un moment donné, est la vitesse du mouvement uniforme qui succède au mouvement varié quand on supprime, à ce mouvement, l'action de la force.

Masse de la terre.—Cavendish a cherché par des expériences directes la valeur de l'attraction de deux masses sphériques m et m'. Il pesait ces masses ; des poids p et p', il déduisait m et m' 70 (28). Il mesurait la distance r de leurs centres. Enfin, avec un appareil particulier il déterminait la force attractive exercée par l'une sur l'autre. Toutes les quantités de la formule étaient donc connues par expérience, sauf f, dont la valeur est

$$f = \frac{rF^2}{mm'}.$$

Cavendish a trouvé $f = 0{,}000\ 000\ 065$, valeur qui a été confirmée par les expériences récentes de MM. Cornu et Baille. Ce résultat signifie que deux masses égales chacune à l'unité de masse, c'est-à-dire pesant $9^{\text{kilog}},808$, et situées à 1 mètre de distance l'une de l'autre, s'attirent avec une force égale à 65 80 millièmes de milligramme.

La valeur de f déterminée, on en a déduit la masse de la terre. Soit en effet un corps de poids p et de masse m ; soit M la masse de la terre et R le rayon terrestre. On a d'une part $p = mg$; d'autre part $p = f\,\frac{mM}{R^2}$. On tire de ces deux formules :

$$M = g\frac{R^2}{f}.$$

On a trouvé ainsi :

$$M = 606 \times 10^{21}.$$

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique*.

1874.

B.—HYDROSTATIQUE.

Condition d'équilibre des liquides sous l'action de la pesanteur.

Principe de Pascal.—Pascal, dans son *Traité de l'*Équilibre des liqueurs énonce ainsi le principe fondamental de l'hydrostatique : « Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, dont l'une soit centuple de l'autre ; en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large, et en surmontera quatre-vingt-dix-neuf. Quelque proportion qu'aient ces ouvertures, et quelque direction qu'aient les pistons, si les forces qu'on met sur ces pistons sont comme
10 les ouvertures, elles seront en équilibre.» Ce principe a été découvert en 1586 par Stevin, mais comme un fait isolé. Pascal en a compris l'importance et en a fait la base de l'hydrostatique.

Égale transmission des pressions dans tous les sens.—Le principe formulé par Pascal peut être généralisé de la manière suivante :—Si l'on exerce sur une portion plane, égale à l'unité de surface, une pression normale à la surface d'un liquide en équilibre, l'effort est transmis dans toutes les directions, soit dans l'intérieur du liquide, soit contre la paroi ; et sa grandeur est toujours égale au produit de la pression primitive par l'étendue
20 de la surface plane que l'on considère. En d'autres termes, si p est la pression exercée sur la surface s ou $\frac{p}{s}$ la pression sur l'unité de surface, la pression P transmise à une surface S aura pour expression : $P=\frac{p}{s}S$. Comme on déduit de là : $\frac{p}{s}=\frac{P}{S}=\frac{P'}{S'}$ $=$constante, on peut dire encore que, dans le cas de la transmission des pressions par un liquide en équilibre, la pression rapportée à l'unité de surface demeure invariable.

Preuve expérimentale de l'égale transmission des pressions dans tous les sens.—Le principe de Pascal étant compris et généralisé, donnons en une démonstration expérimentale.

On a deux vases cylindriques A et B, de sections très-différentes S et s, communiquant ensemble par le tube C et en partie pleins d'eau. Des pistons P et p s'appliquent sur les surfaces libres du liquide dans les deux vases, et on est arrivé, par tâtonnement, à leur donner des poids tels que l'équilibre de tout le système soit réalisé. Peu importe que le liquide soit à la même hauteur ou à des hauteurs différentes dans les deux cylindres, nous n'avons pas à nous en inquiéter. 30

L'équilibre est possible ; il existe. Or si, à ce moment, nous plaçons un poids de 1 kilogramme sur le piston p, l'expérience nous montre qu'il faut, dans tous les cas, pour empêcher le piston P de se mouvoir, placer sur lui un nombre N de kilogrammes tel qu'on ait $N = \frac{1}{s} S$. C'est la démonstration du principe. 40

L'expérience que nous venons de décrire représente le point de départ théorique d'un appareil, fréquemment employé dans l'industrie, pour transformer des efforts, relativement assez faibles, en actions comprimantes très énergiques : on le nomme *Presse hydraulique*.

Presse hydraulique.—B est une pompe aspirante et foulante piston plongeur de petite section. Ce piston, mis en mouvement par un levier à bras inégaux L, fait arriver l'eau dans le corps de pompe A, par l'intermédiaire du tuyau T′. Le piston plongeur de A présente une large section, et, en se soulevant, il peut comprimer fortement tels corps que l'on voudra contre le plancher fixe F. Dans le canal de communication T′ se trouvent : 1° une soupape *a* s'ouvrant de bas en haut et empêchant l'eau de revenir de A vers B ; 2° une soupape de sûreté *b* qui s'ouvre lorsque la pression dépasse une limite qui compromettrait la solidité de l'appareil ; 3° une vis à filet en partie interrompu c, qui, lorsqu'on la fait tourner dans un sens convenable, permet à l'eau contenue en A de s'échapper afin que le grand piston puisse redescendre. 50 60

On voit, par ces dispositions, que si l'effort exercé à l'extrémité de la grande branche du levier est de 10 kil., si les longueurs des deux bras du levier sont dans le rapport de 1 à 10, et les sections des deux pistons dans le même rapport, l'effort total transmis par le grand piston sera de 1000 kil. Quant au

travail mécanique, il n'augmente jamais; car, lorsqu'il passe un litre d'eau de B en A, ce volume de liquide, se répartissant sur une section 10 fois plus grande, s'élève à une hauteur 10 fois plus petite. Donc, quand l'effort transmis par le grand piston
70 est 10 fois plus grand, le chemin qu'il parcourt est 10 fois plus petit; et, dans tous les cas, le produit de la force par le chemin que parcourt son point d'application, ou le travail mécanique, demeure constant. Il va sans dire qu'ici, comme dans toutes les machines, il y a du travail perdu par le fait des résistances passives et que le travail utile est moindre que le travail moteur.

La presse hydraulique est utilisée, dans l'industrie, pour extraire les liquides contenus dans les tissus de certains végétaux pour enlever aux graines oléagineuses la matière grasse qu'elles renferment. Elle sert à exercer de fortes tractions et même à
80 soulever des fardeaux d'un poids considérable.

Direction des pressions dans l'intérieur des masses liquides. —Pour comprendre la raison d'être de ce principe de Pascal, dont nous venons de donner une vérification expérimentale, il suffit de se reporter aux idées générales que nous possédons sur la constitution des liquides. Un liquide en équilibre est en général soumis à trois sortes de forces : 1° les actions réciproques de ses molécules, qui font, par exemple, qu'une gouttelette de liquide rendue libre conserve la forme sphérique; 2° les pressions mécaniques exercées en un point quelconque de sa masse ; 3°
90 la pesanteur, qui peut être considérée comme agissant sur chaque molécule individuellement. Lorsque les deux dernières forces interviennent isolément, ou toutes les deux à la fois, elles occasionnent un rapprochement dans les molécules du milieu, et par suite font naître une pression nouvelle qui n'existait pas quand les actions moléculaires se produisaient seules, pression qui s'exerce, soit dans l'intérieur du liquide, soit contre les parois du vase qui le renferme. Or, si l'on considère la mobilité parfaite des molécules comme caractéristique de l'état fluide, on arrive à cette conclusion : que, pour
100 l'équilibre, la pression sur un élément plan appartenant à la paroi ou à la masse liquide elle-même doit toujours être normale à cet élément. En effet, si la résultante des

pressions sur un élément *m* de la paroi ne lui était pas perpendiculaire, elle donnerait, située dans le plan de l'élément, une réaction latérale que rien ne pourrait annuler, puisqu'il n'existe que des frottements négligeables ; les molécules liquides glisseraient à la surface de la paroi, l'équilibre serait impossible. Il en est de même en choisissant un élément *m'* dans l'intérieur du liquide. En effet, faisons passer par l'élément choisi un plan qui divise le vase en deux compartiments A et B ; nous ne compro- 110
mettrons en rien l'équilibre primitif, nous augmenterons même sa stabilité, si, sans modifier les distances ou les positions relatives des molécules de la portion A, nous les rendons solidaires les unes des autres, de manière à les constituer, comme si elles appartenaient à un corps solide. Alors l'élément *m'* peut être considéré comme appartenant à une paroi, et le raisonnement précédent lui est applicable.

Dans tout ce qui suivra, pour qu'on attache un sens précis à ces mots, *pression sur un élément liquide*, nous supposerons toujours implicitement cet élément constitué par une lame plane, d'une 120
petite étendue superficielle, d'un épaisseur très faible et solidifiée, la solidification étant comprise comme il vient d'être dit.

Grandeur des pressions.—En second lieu, on démontre par le calcul que, dès l'instant que la pression est normale à un élément donné, quelle que soit la direction de l'élément, la grandeur de cette pression est constante et indépendante aussi de cette direction.

Nous sommes ainsi conduits à cet autre énoncé, qui renferme implicitement la formule de Pascal : *Dans l'intérieur d'un liquide en équilibre, la pression exercée sur un élément de surface est* 130
toujours normale à l'élément et indépendante de sa direction.

Cette proposition est vraie dans toute sa généralité, quelle que soit la grandeur de la surface pressée, et, de plus, la position occupée par cette surface de grandeur constante dans la masse liquide n'a aucune influence sur la valeur de la pression, si les forces qui interviennent sont uniquement les actions mutuelles et les pressions mécaniques, ou si du moins ces dernières sont très grandes par rapport au poids du liquide. Mais lorsque la pesanteur est la force dominante, il est évident que la pression

140 exercée sur une même surface croît avec la profondeur. Néanmoins, même dans ce cas, un élément qu'on fait tourner autour d'un point donné m' subit une pression dont la grandeur est indépendante de la direction de cet élément. Du reste, ce principe, que nous posons ainsi au début, va se trouver rigoureusement établi par la vérification expérimentale de toutes ses conséquences.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique*. 1874.

Cas particuliers concernant la mesure des poids spécifiques. —1° *Corps solides solubles dans l'eau.*—On prend, dans ce cas, un liquide intermédiaire dans lequel le corps solide ne soit pas 150 soluble; l'huile d'olive ou l'essence de térébenthine, par exemple, quand il s'agit du sucre. On détermine par les méthodes ordinaires le poids spécifique δ du sucre par rapport à l'huile, c'est-à-dire le rapport des poids de volumes égaux de sucre et d'huile, $\delta = \frac{P}{P'}$; puis le poids spécifique δ' de l'huile par rapport à l'eau, $\delta = \frac{P_h}{P_e}$; le produit $\delta\delta'$ des deux poids spécifiques sera égal à $\frac{P_s}{P_e}$; ce sera donc le poids spécifique du sucre.

2° *Corps renfermant des cavités nombreuses dans leur intérieur, vulgairement nommés poreux.*—Dans ce cas on peut se proposer deux sortes de détermination de poids spécifique: 1° quand le 160 corps est considéré sous son volume réel, c'est-à-dire en ne tenant compte que de la matière qui le forme, abstraction faite des cavités qu'il renferme; ou bien, 2° en le prenant sous le volume apparent, c'est-à-dire en cherchant le rapport du poids du corps au poids d'un volume d'eau égal à son volume extérieur. Cette distinction a de l'importance, dans quelques cas. Ainsi on a reconnu que la matière qui forme les différents bois, matière où la cellulose domine, a un poids spécifique sensiblement constant; tandis que ces bois eux-mêmes, très inégalement poreux, ont des poids spécifiques qui varient depuis 0,24 pour le 170 liège jusqu'à 1,33 pour l'ébène.

Pour obtenir le poids spécifique sous le volume réel, on se sert de la méthode du flacon. Le corps est réduit en poudre, et, après l'avoir plongé dans l'eau, on a le soin de laisser longtemps le flacon ouvert, sous le récipient de la machine pneumatique, où le vide est maintenu, afin de faire dégager les bulles d'air intercalées entre les particules de matière. L'opération s'achève ensuite à la façon ordinaire.

Pour évaluer le poids spécifique d'un corps sous son volume apparent, on le pèse dans l'air; soit P son poids. On le recouvre d'une couche mince de cire; l'augmentation de poids p 180 représente le poids de la cire employée dont le poids spécifique d est déjà connu. Enfin, on prend le poids P′ du corps enduit de cire et plongé dans l'eau. Ce nombre P′ représente le poids P du corps, plus le poids p de la cire, moins le poids d'un volume d'eau $\frac{P}{x}$ égal au volume extérieur du corps (x étant le poids spécifique cherché), moins le poids $\frac{p}{d}$ d'un volume d'eau égal au volume de la cire. On peut donc écrire:

$$P' = P + p - \frac{P}{x} - \frac{p}{d}.$$

d'où

$$x = \frac{P}{P - P' + p\left(1 - \frac{1}{d}\right)}. \qquad 190$$

3° *Corps solides qu'on ne peut mettre en contact avec les liquides.* —Enfin il est des substances, telles que les poudres destinées aux armes à feu, dont les grains, formés par la juxtaposition de matières hétérogènes, ne peuvent être plongés dans les liquides qui les mouillent, sans éprouver des altérations qui changent leur poids spécifique. Dans ce cas, on détermine le volume de la substance en la mettant exclusivement en contact avec une atmosphère gazeuse; et on se sert, à cet effet, d'un appareil nommé le *voluménomètre*, que nous décrirons dans le chapitre des Problèmes, comme une application de la loi de Mariotte. 200 Le rapport du poids au volume donne alors le poids spécifique cherché.

TABLEAU DES POIDS SPÉCIFIQUES DES PRINCIPAUX CORPS SOLIDES A 0°

Corps	Poids spécifique	Corps	Poids spécifique
Platine écroui	23,00	Marbre	2,84
Platine fondu	21,16	Aluminium	2,68
Or fondu	19,26	Quartz	2,66
Plomb	11,35	Verre ordinaire	2,50
Argent	10,47	Porcelaine	2,15
Cuivre en fil	8,88	Soufre	2,03
Laiton	8,39	Ivoire	1,92
Acier non écroui	7,82	Phosphore	1,72
Fer en barre	7,79	Sodium	0,96
Étain	7,29	Eau solide	0,93
Fer fondu	7,21	Potassium	0,87
Zinc fondu	6,86	Bois de hêtre	0,85
Antimoine fondu	6,61	Bois d'orme	0,80
Chrome	5,99	Bois de sapin	0,66
Iode	4,95	Bois de peuplier	0,38
Sélénium cristallisé	4,89	Liège	0,24
Diamant	3,32		

POIDS SPÉCIFIQUES DES PRINCIPAUX LIQUIDES A 0°

Liquide	Poids spécifique	Liquide	Poids spécifique
Mercure	13,596	Eau liquide à 0°	0,9998
Brome	2,911	Huile d'olive	0,913
Acide sulfurique normal	1,854	Essence de térébenthine	0,869
— ordinaire	1,843	Alcool anhydre à 0°	0,8069
Acide azotique concentré	1,520	Éther sulfurique	0,756
Sulfure de carbone	1,271		

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.* 1874.

BAROMÈTRE.

En 1695, Amontons fit connaître son *baromètre de mer*, ainsi appelé parce qu'il avait été inventé pour l'usage des marins. C'est un tuyau conique, fort étroit, dont l'ouverture inférieure, la plus large, n'a qu'une ligne de diamètre ; le vide qui se trouve dans la partie supérieure suffit pour empêcher le mercure de s'échapper par l'extrémité inférieure ouverte. Mais l'effet de la

capillarité nuisit beaucoup à la sensibilité et à l'exactitude de cet instrument dont la simplicité séduisait au premier abord. Le *baromètre polytubulé* du même physicien était plus compliqué ; mais il manquait également de précision, à cause des dilatations inégales des différentes matières dont il était composé. Aussi, l'un et l'autre baromètre ne tardèrent-ils pas à être abandonnés.

Voilà comment, au XVIIe siècle, les premiers constructeurs de baromètres s'étaient ingéniés, par des artifices divers, à varier le tube de Torricelli, pour rendre sensibles à l'œil les moindres changements qu'éprouve la colonne du liquide en fonction de la pression variable de l'atmosphère.

Mais à mesure qu'on avançait, les obstacles semblaient se multiplier tellement qu'on renonçat un moment à l'espoir de faire concorder les changements marqués par l'instrument d'invention humaine, avec les fluctuations de cet océan aérien qui, depuis la création du monde, pèse sur tous les êtres.

Les baromètres, inventés au XVIIIe siècle, de simples devinrent de plus en plus compliqués, par suite du besoin que les physiciens sentaient d'une exactitude plus grande.

Un célèbre mathématicien, Jean Bernoulli, présenta, en 1710, à l'Académie des Sciences de Paris, un baromètre, dont Dominique Cassini avait déjà indiqué le plan. Ce baromètre, dit *rectangulaire*, se composait de deux tubes de verre, d'inégale grosseur, emboîtés l'un dans l'autre : le diamêtre du tube vertical, plus gros, A, est un multiple, déterminé d'avance, du diamètre horizontal. Il est évident que si le mercure descend dans le premier, de D en G, il se déplacera proportionnellement dans le second tube, de I en E. Musschenbroek, physicien hollandais, faisait grand cas de ce baromètre, à cause de sa simplicité et de son extrême sensibilité. Cependant il lui trouvait un grand défaut : c'était de laisser l'air s'introduire facilement par le petit tube. Pour y remédier, il conseillait de ne lui donner qu'une ligne où moins de diamètre, et de se servir de mercure bien purgé d'air par l'ébullition. C'est ici que vient se placer un fait important dans l'histoire du baromètre.

En 1705, Pontchartrain, chancelier de France, avait un

baromètre qui marquait toujours de 18 à 19 lignes au-dessous du niveau des autres baromètres, bien que ceux-ci fussent composés du même verre, remplis du même mercure et suspendus dans le même lieu. Pontchartrain voulut en savoir la raison. Tous les physiciens de l'Académie se mirent en campagne pour satisfaire la curiosité du chancelier. A quoi fallait-il
50 attribuer la différence signalée? A un défaut de construction. C'était là du moins l'opinion des membres de l'Observatoire royal. Mais Amontons ne partagea pas cette opinion ; et pour mieux se rendre compte des éléments du problème, il commanda au fabricant du baromètre de Pontchartrain quatre instruments pareils, de deux sortes de verre. Puis il les plaça dans un même lieu, ainsi que deux autres baromètres dont il se servait habituellement. Cela fait, il constata que les six baromètres offraient entre eux un maximum de différence de 10 lignes. Mais ce qui lui parut surtout étrange, c'était de voir que la différence variait
60 dans une même journée; ainsi, le matin elle était de 18 lignes, l'après-midi de 19, et le soir de 9 lignes. L'habile physicien crut en avoir trouvé la cause dans la porosité du verre, qui laisserait entrer de l'air dans l'*espace de Torricelli*, comme on appelait la partie vide du tube barométrique.

Sur ces entrefaites, Amontons vint à mourir. La question fut reprise en 1706; l'Académie chargea Maraldi de répondre au chancelier. Le savant académicien s'assura le concours de Homberg, qui lui apprit que les tubes, avant de recevoir le mercure, avaient été lavés à l'esprit-de-vin. Ce renseignement
70 fit porter l'attention de Maraldi sur l'alcool, dont les vapeurs auraient pu, par leur élasticité, déprimer la colonne de mercure, et il conclut, d'une série d'essais, qu'il faut, dans la construction des baromètres, éviter avec soin le contact de l'humidité. Enfin, ce ne fut que cinquante ans plus tard que Deluc trouva que, pour fabriquer des baromètres bien concordants, il faut donner aux tubes d'un verre pur la même capacité dans toute leur étendue, et faire bouillir préalablement le mercure, pour en chasser tout l'air et toute l'humidité. La dernière opération offrit des difficultés qui paraissaient d'abord insurmontables ; on
80 n'est parvenu à les vaincre qu'après de longs tâtonnements. Il

importait surtout de débarrasser le mercure d'un oxyde noir, qui le ternit, en modifie la densité et le fait adhérer au verre. Le mercure ainsi purifié présente l'éclat vif, métallique, du miroir le plus parfait.

La disposition de l'échelle apporta d'autres difficultés que sentirent déjà les premiers constructeurs. A la division par pouces et lignes fut, dès la fin du XVIII^e siècle, substituée la division par centimètres et millimètres. Mais, quelle que soit la mesure qu'on adopte, les intervalles des subdivisions doivent être, avant tout, parfaitement égaux entre eux. Puis, comme le mercure ne peut ni s'élever ni s'abaisser dans le tube sans s'abaisser ni s'élever d'une quantité correspondante dans la cuvette du réservoir, il faudra disposer l'échelle de manière que l'on puisse à la fois observer exactement les deux niveaux, puisqu'ils sont tous deux variables. Pour les baromètres à demeure, destinés à des expériences de laboratoire, cette disposition peut être exécutée avec une grande précision et d'une manière très-simple, comme le montre le *baromètre fixe* de M. Regnault, où l'on obtient, par une vis verticale, l'affleurement de la pointe avec une rigueur extrême, en même temps que la lecture des niveaux est faite à l'aide d'une lunette grossissante. Mais cet instrument n'est pas transportable.

HOEFER, *Histoire de la Physique.*

1900.

MACHINE PNEUMATIQUE.

MACHINE PNEUMATIQUE ORDINAIRE.

Premiers essais.—La machine pneumatique, qui nous a déjà servi bien souvent, dans les précédents chapitres, pour les expériences sur les fluides élastiques, est destinée à raréfier un gaz contenu dans un récipient. Dès le dix-septième siècle, peu après la découverte du baromètre, les académiciens de Florence, voulant faire le vide absolu dans un ballon, le placèrent à la partie supérieure d'un long tube barométrique; ils remplirent le tout de mercure et renversèrent l'appareil dans

une cuvette, comme pour la construction du baromètre. Le
10 mercure, en descendant, laissa le vide dans le ballon, qu'on
pût dès lors, sans inconvénient, séparer du tube barométrique.
Ce procédé exige l'emploi et le maniement d'une grande masse
de mercure ; il est par suite fort incommode. On y renonça
complètement lorsque, en 1650, Otto de Guericke eut inventé
sa machine pneumatique. Celle-ci ne peut, il est vrai, donner
des résultats comparables à ceux de la chambre barométrique ;
mais, il faut le reconnaître, on a rarement besoin d'un vide
aussi parfait dans les expériences de physique ; il est bien
suffisant, dans la majorité des cas, que la force élastique d'un
20 gaz contenu dans un récipient soit réduite à 1 ou 2 millimètres
de mercure.

Dans ces dernières années, cependant, diverses expériences
ont exigé que le vide fût obtenu avec une très grande perfection ;
M. Geissler et M. Sprengel ont construit des machines à
mercure moins faciles à manœuvrer que la machine d'Otto
de Guericke, moins promptes surtout dans leurs effets, mais
excellentes dans leurs résultats : nous les ferons connaître plus
loin. Nous commencerons par décrire la machine pneumatique
ordinaire, non telle qu'elle fut construite à l'origine, mais telle
30 qu'elle l'est de nos jours.

Principe théorique.—Voici l'idée fondamentale servant de
point de départ dans la construction de la machine pneuma-
tique : 1° il est évident *a priori* qu'un piston primitivement en
contact avec la base d'un corps de pompe et soulevé ensuite,
laisse le vide s'établir au-dessous de lui ; 2° si l'on fait com-
muniquer le récipient qui contient le gaz à raréfier avec ce
corps de pompe, où le vide existe, le fluide élastique du
récipient, dès lors, peut s'y répandre librement ; 3° il suffit de
répéter la même suite d'opérations, en employant un deuxième,
40 un troisième espace vide, tous identiques au premier ; chaque
fois, le gaz, en pénétrant dans l'espace additionnel qui lui est
offert, augmentera de volume, et par suite, la force élastique du
fluide dans le récipient décroîtra de plus en plus.

Description de la machine.—Le principe établi, décrivons
les organes essentiels d'une machine pneumatique, et faisons

comprendre comment elle fonctionne. Le récipient consiste, par exemple, en une cloche remplie d'air à la pression ordinaire posée sun un disque de verre parfaitement plan, qu'on nomme la *platine* de la machine pneumatique. Cette cloche a ses bords bien rôdés et frottés avec du suif, pour 50 assurer une fermeture exacte qui empêchera l'air extérieur de rentrer, quand le vide sera fait. L'espace additionnel est constitué par un cylindre creux, de cuivre ou de cristal, nommé *corps de pompe*, dans l'intérieur duquel un piston peut glisser à frottement doux. Celui-ci est creusé, suivant son axe, d'un canal cylindrique qu'une soupape, mobile de bas en haut, peut ouvrir ou fermer en temps utile. Enfin, le tube, que nous supposerons d'abord muni d'un robinet, établit la communication entre le corps de pompe et la cloche.

Jeu de la machine.—Loi de la raréfaction.—Expliquons 60 maintenant le jeu de la machine. Le robinet étant fermé au début, et la soupape demeurant abaissée par son propre poids, on soulève le piston qui se trouvait placé d'abord au point le plus bas de sa course. La soupape reste fermée par la pression de l'air extérieur; aucun gaz ne peut pénétrer entre le piston et le corps de pompe; le vide se produit donc au-dessous du piston. Ouvrons le robinet: l'air du récipient se précipite dans l'espace vide qui lui est offert; son volume, qui était V, volume de la cloche, devient $V+v$, somme des volumes du récipient et du corps de pompe. Si donc H re- 70 présente la pression initiale de l'air, la force élastique H_1 du gaz dans le récipient, après cette première ascension du piston, sera donnée, d'après la loi de Mariotte, par la formule: $(V+v)H_1=VH$. D'où:

$$H_1=\frac{V}{V+v}H.$$

Elle est donc une fraction de la force élastique primitive exprimée par $\frac{V}{V+v}$. Il est bien entendu que nous comprenons dans V et le volume du récipient et la capacité du tube, capacité qui est d'ailleurs en général négligeable par rapport à celle de la cloche.—Fermons le robinet et faisons descendre le 80

piston. L'air du corps de pompe diminue de volume, augmente de force élastique, et la soupape se soulève bientôt, parce qu'elle est plus pressée de bas en haut par l'air qu'on comprime dans le corps de pompe que de haut en bas par l'air extérieur ; la portion de gaz enlevée au récipient s'échappe donc dans l'atmosphère, et le corps de pompe est ramené à son état primitif.

Recommençons la même série d'opérations ; on voit qu'à chaque ouverture du robinet, c'est toujours comme un nouvel
90 espace vide V qu'on met en communication avec l'air raréfié du récipient ; donc, après la deuxième ascension du piston, la force élastique H_2 du gaz confiné sera devenue :

$$H_2 = \frac{V}{V+v} H_1 = \left(\frac{V}{V+v}\right)^2 H ;$$

après la troisième

$$H_3 = \frac{V}{V+v} H_2 = \left(\frac{V}{V+v}\right)^3 H ;$$

après la $n^{\text{ème}}$

$$H_n = \frac{V}{V+v} H_{n-1} = \left(\frac{V}{V+v}\right)^n H.$$

Ainsi la force élastique du gaz contenu dans la cloche décroît comme les termes d'une progression géométrique dont la raison
100 est $\frac{V}{V+v}$. On peut donc dire que le vide absolu n'est pas réalisable avec la machine que nous venons de décrire ; car, dans une progression géométrique décroissante, aucun terme n'est jamais nul. Mais il faut ajouter que, s'il n'existait aucune perturbation étrangère, la raréfaction pourrait atteindre telle limite que l'on voudrait : il suffirait de multiplier les coups de piston.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.*

L'AVIATION DE DEMAIN.

Ces lois fondamentales avec toutes leurs déductions sont absolument applicables au vol des oiseaux. Il est incontestable,

par exemple, qu'un oiseau ne peut se soutenir dans l'air qu'à la condition d'avancer. Pour un oiseau en plein vol, l'incidence constante de son corps et de ses ailes est tellement faible qu'on serait tenté de supposer l'oiseau parfaitement horizontal. En tant qu'aéroplane, l'oiseau aurait avantage à tenir ses ailes immobiles et constamment étendues ; s'il est obligé, dans le vol-ramé, de battre des ailes, c'est que ces organes lui servent en même temps de propulseurs. La propulsion est due en partie à 10 la petite composante horizontale de la résistante de l'air, normale à l'aile, qui, ainsi que l'a démontré M. Marey, pendant l'abaissement tourne vers l'arrière sa face inférieure ; mais cette composante seule serait probablement insuffisante à la propulsion, d'autant plus que pendant le relèvement elle est dirigée dans le sens opposé, et par conséquent devient une résistance à l'avancement. Aussi faut-il chercher le vrai propulseur de l'oiseau dans les extrémités flexibles des grandes rémiges de l'aile, qui agissent à la façon d'hélices flexibles. Ce voile élastique de l'aile joue en aviation un rôle très important. 20 L'observation nous apprend que chaque espèce d'oiseau possède une vitesse propre de translation (vitesse normale) ; qu'elle est plus considérable chez les espèces lourdes et moins chez celles qui sont munies de grandes voilures. Ainsi un canard qui porte jusqu'à 11 kilos par mètre carré de surface est-il obligé, pour se soutenir, de voler à une vitesse bien supérieure à celle de l'hirondelle ou l'alouette, dont la charge par mètre carré ne dépasse guère 1,5 kilogr. Lorsqu'un oiseau, l'hirondelle ou le pigeon, par exemple, désire accélérer son allure, il diminue sa voilure, en ployant à demi les ailes et serrant la queue qui joue 30 le rôle, non de gouvernail, comme on l'a cru longtemps, mais bien de voile supplémentaire. La vitesse est indispensable à l'oiseau pour s'enlever de terre, aussi voyons-nous les oiseaux à l'essor acquérir cette vitesse soit par une chute d'un endroit plus élevé, soit par la course ou le saut ; faute de vitesse suffisante l'oiseau ne peut pas s'enlever ; cette particularité est bien connue des chasseurs. Lorsqu'un oiseau à l'essor n'a pas encore atteint la vitesse normale, on le voit augmenter sa voilure à outrance, déployer ses ailes à la dernière limite de leur mesure

40 et étaler sa queue en éventail; lorsqu'au contraire il est arrivé à
sa vitesse nécessaire, les ailes reviennent à leur déploiement
moyen et la queue se referme. Si l'on calcule, d'après la
théorie aéroplane, le travail nécessaire à l'oiseau pour sa pro-
pulsion, on trouve qu'il n'excède en rien le travail musculaire
moyen des autres animaux par unité de poids de muscle. Au
lieu de trouver, comme Navier pour la théorie orthoptère,
qu'une hirondelle dépense un dix-septième de cheval-vapeur, on
arrive à établir que le kilogramme de muscles pectoraux d'un
oiseau, qui répresente environ un sixième du poids total, doit
50 produire un travail de 5 à 6 kilogrammètres, ce qui ramène à 15
kilos environ le poids du cheval-vapeur. C'est à peu près le
travail normal des muscles de la plupart des animaux; c'est aussi
le chiffre que donne la mesure directe de la force des pectoraux
chez les oiseaux, chiffre confirmé par les expériences thermody-
namiques. Nous ne nous attarderons pas ici à multiplier les
exemples qui serviraient à démontrer la parfaite concordance de
la théorie aéroplane avec tous les phénomènes observés dans le
vol, soit ramé, soit plané, ces deux modes de locomotion ne se
distinguant d'ailleurs que par la propulsion, qui est active dans le
60 premier, tandis que dans le second elle devient passive, c'est-à-
dire qu'elle se produit aux dépens de la chute constante de
l'oiseau dans l'air; nous nous bornerons à constater qu'il
n'y a pas un mouvement, pas une manœuvre exécutée par
l'oiseau qui ne trouve son explication rationnelle dans la théorie
aéroplane.

Il est encore un point très important dans la question du vol,
c'est celui de la stabilité ou de l'équilibre dynamique de
l'aéroplane. Les lois mêmes de la résistance de l'air se sont
chargées de donner une solution simple à ce problème qui, à
70 première vue, semble si difficile à résoudre. Avanzani avait
déjà observé que, dans un plan exposé obliquement au choc
d'un fluide en mouvement, la position du centre de pression
dépendait de l'angle d'incidence du plan. Joëssel à établi, par
des expériences directes, la loi de ce déplacement. Il a démontré
qu'à 90° le centre de pression coïncide avec le centre de figure
du plan, et qu'à mesure que le plan s'incline dans le courant

fluide, ce point avance, suivant une loi mathématique (équation du limaçon de Pascal), jusqu'à une limite qui se trouve placée à un cinquième de la longueur du plan à partir de son arête antérieure. Cette remarquable loi du déplacement du centre de pression en fonction de l'incidence suffit au maintien automatique 80 de l'équilibre longitudinal des aéroplanes. En effet, prenons un aéroplane dont l'équilibre dynamique est réglé pour l'incidence optima, par exemple ; cela veut dire qu'à cette incidence les centres de gravité et de pression se trouvent sur la même verticale ; supposons que, pour une cause quelconque, l'incidence vienne à augmenter : aussitôt, en vertu de la loi de Joëssel, le centre de pression se portera en arrière, tandis que le centre de gravité conservera son ancienne position : il se produira par conséquent un couple de forces tendant à diminuer l'incidence, qui décroîtra jusqu'au moment où les deux centres viendront de 90 nouveau à coïncider. L'inverse aura lieu si l'incidence venait à diminuer : la stabilité de l'appareil sera donc par ce moyen automatiquement assurée. Les oiseaux, dans toutes leurs évolutions, se conforment inconsciemment à cette loi ; par l'avancement ou le recul des pointes de leurs ailes, ils déplacent leur centre de voilure qui, à l'incidence optima, coïncide avec leur centre de gravité, situé pour cette raison, pendant le vol, à la partie antérieure de leur corps.

En ajoutant cette dernière loi de stabilité aux lois ci-dessus déduites pour les aéroplanes, on a un ensemble complet, qui 100 permet, dès maintenant, de déterminer avec une approximation, peut-être assez grossière encore, mais déjà suffisante en principe, toutes les conditions du mouvement des aéroplanes ; cela donne la possibilité de nous former une idée générale du phénomène du vol et de tenter la réalisation pratique d'appareils aviateurs.

S. DRZEWIECKI, *Revue Générale des Sciences*.

30 *Décembre* 1891.

C.—ACOUSTIQUE.

Propagation et vitesse du son.—« Le son se répand, dit Musschenbroek, circulairement de toutes parts, en sorte que le corps sonore se trouve dans le centre du son.» A l'appui de cette proposition, le physicien hollandais cite les faits d'une cloche qui, suspendue et mise en branle dans un lieu spacieux, s'entend en haut, en bas, latéralement, en un mot dans les directions d'une infinité de rayons dont se compose une sphère. Le son se propage donc par ondulation sphérique. Quand l'ondulation rencontre un obstacle, le segment arrêté par cet obstacle revient sur lui et l'ondulation se continue en sens inverse. Si le corps qui forme obstacle est lui-même susceptible de vibrer, il produit aussi un son semblable à celui du centre phonique. Ces données étaient déjà connues des physiciens dès la fin du seizième siècle.

Des faits vulgaires, tel que le bruit d'un marteau, toujours en retard sur la perception du mouvement exécuté, ont dû de bonne heure faire comprendre que, si la transmission de la lumière qui éclaire les objets paraît instantanée, la transmission du son, qui est une vibration de l'air, met un certain temps à parvenir à l'oreille.

Gassendi paraît s'être le premier occupé de la question de la vitesse du son, sans préciser les résultats auxquels il était parvenu. Le P. Mersenne fit à ce sujet plusieurs expériences: dans l'une, il trouva que le son parcourt 1473 pieds par seconde, et, dans une autre, il ne trouva que 1380 pieds pour le même intervalle de temps. Les physiciens de l'Académie *del Cimento*, de Florence, observèrent, en 1660, que le son du canon ne met qu'une seconde pour parcourir une distance de 1183 pieds. En répétant ces expériences, R. Boyle trouva 1200 pieds. Les données obtenues par Walker oscillaient entre 1150 et 1526 pieds, dont la moyenne est de 1338. Ce dernier résultat ne s'éloigne pas beaucoup de celui de Bianconi, qui remarqua en même temps que la vitesse augmente avec la température, et

que le son emploie en hiver 4 secondes de plus qu'en été pour parcourir la même distance de 10 milles italiens. En Angleterre, Flamsteed, Halley et Derham trouvèrent 1020 pieds per seconde, résultat qui s'accordait avec la détermination théorique de Newton. Ce grand géomètre avait essayé le premier de déterminer par la théorie la vitesse (longitudinale) du son. Depuis lors plusieurs géomètres suivirent la même voie et ils parvinrent à établir théoriquement que cette vitesse 40 est égale à $\frac{\sqrt{gh}}{D}$ en exprimant par D la densité de l'air et par gh son élasticité, où g désigne la gravité et h la hauteur de la colonne barométrique. D'après cette formule, le calcul donnait de 880 à 915 pieds par seconde. Ce résultat s'éloignait trop de celui de l'observation pour ne pas sauter aux yeux de tout le monde. Mais les géomètres, plutôt que de renoncer à une théorie qu'ils estimaient parfaitement conforme aux lois de la mécanique, aimaient mieux recourir à des suppositions purement gratuites. Ainsi, ils supposaient, entre autres, « que l'élasticité peut n'être pas toujours proportionnelle à la densité, 50 à cause de quelques altérations possibles dans différents degrés de compression, et que ces différences proviennent d'une qualité chimique inconnue. »

En France, Cassini, Huyghens, Picard et Roemer trouvèrent pour la vitesse du son 1097 pieds par seconde.

En somme, les résultats obtenus présentaient des discordances considérables, dont la plupart étaient supérieures aux incertitudes que comportent les erreurs d'observation.

La question en était là, lorsque les membres de l'Académie des sciences de Paris essayèrent, en 1738, de la résoudre 60 définitivement. A cet effet ils choisirent pour stations l'Observatoire, Montmartre, Fontenay-aux-Roses et Montlhéry. Le signal des expériences, qui se faisaient la nuit, fut donné par une fusée lancée de l'observatoire : on tirait toutes les dix minutes un coup de canon à l'une des stations dont les distances avaient été exactement déterminées d'avance ; on mesurait, aux autres stations, le temps qui s'était écoulé entre la perception de la lumière et l'arrivée du bruit, et l'on calculait la vitesse du

son en divisant les distances par les temps observés. De ces
70 expériences, qui furent continuées pendant plusieurs jours dans des conditions atmosphériques très différentes, on crut devoir conclure : 1° que la vitesse du son est indépendante de la pression et de l'état hygrométrique de l'air; 2° qu'elle est constante à toute distance, c'est-à-dire que le son se transmet uniformément; 3° qu'elle augmente avec la température; 4° qu'elle s'ajoute à la vitesse du vent ou s'en retranche, suivant que le bruit et le vent marchent dans le même sens ou en sens opposé; 5° qu'elle est égale à 333 mètres (1038 pieds) à la température de zéro.

80 Ces expériences furent répétées en Allemagne, et donnèrent des résultats peu concordants.

Les discordances signalées dépendaient surtout de l'influence du vent, dont les premiers expérimentateurs ne s'étaient pas doutés, et de l'état thermométrique de l'atmosphère pendant les expériences. Ces considérations décidèrent, en 1822, le Bureau des Longitudes à charger une commission, composée de Prony, Bouvard, Arago, Gay-Lussac et A. de Humboldt, de répéter les expériences de 1738. Ils choisirent pour stations Montlhéry et Villejuif. Les pièces d'artillerie qui devaient
90 produire le son étaient servies par des officiers d'artillerie, et pour compter l'intervalle écoulé entre l'apparition de la lumière (les expériences étaient faites la nuit) et l'arrivée du son, les membres de la commission avaient à leur disposition les excellents chronomètres de Bréguet. Pour se mettre à l'abri de la cause d'erreur due à la vitesse du vent, ils eurent soin de produire deux sons pareils au même instant dans les deux stations (Montlhéry et Villejuif) et d'observer dans chacune d'elles le temps que le son de la station opposée mit à y arriver; le vent produisant des effets contraires sur les deux vitesses, la
100 moyenne des résultats devait être aussi exacte que si l'air avait été parfaitement tranquille. Ils savaient que les corrections de température étaient, pour chaque degré du thermomètre centigrade, de $0^{m},626$; et ils avaient déterminé avec la plus grande précision la distance du canon de Villejuif au canon de Montlhéry ($18611^{m},51982$). Tout ayant été ainsi disposé, la

moyenne des expériences faites le 21 juin 1822 donna $340^{m},885$ pour l'espace parcouru par le son dans une seconde de temps. Mais comme il pouvait y avoir quelque doute sur la simultanéité des observations, et qu'il était difficile d'évaluer le temps ainsi que la distance avec une rigueur absolue, les académiciens 110 nommés déduisirent de l'ensemble de leurs observations que la vitesse du son est telle, qu'à la température de 10° il doit parcourir 337 mètres et un cinquième dans une seconde de temps.

En racontant les expériences auxquelles il avait concouru, Arago signale un fait singulier : les bruits du canon qui se propageaient du nord au sud n'avaient pas la même intensité que ceux qui se propageaient, en sens inverse, du sud au nord. « Les coups tirés à Montlhéry y étaient, dit-il, accompagnés d'un roulement semblable à celui du tonnerre et qui durait de 120 20 à 25 secondes. Rien de pareil n'avait lieu à Villejuif : il nous est seulement arrivé quelquefois d'entendre, à moins d'une seconde d'intervalle deux coups distincts de Montlhéry ; dans deux autres circonstances, le bruit du canon a été accompagné d'un roulement prolongé. Ces phénomènes n'ont jamais eu lieu qu'au moment de l'apparition de quelques nuages ; par un ciel complètement serein, le bruit était unique et instantané. Ne serait-il pas permis de conclure de là qu'à Villejuif les coups multipliés du canon de Montlhéry résultaient d'échos formés dans les nuages, et de tirer de ce fait un argument favorable 130 à l'explication qu'ont donnée quelques physiciens du roulement du tonnerre ? »

Cependant les observateurs continuèrent leur œuvre en multipliant les expériences. L'exemple donné par les Académiciens français fut suivi en Hollande par les professeurs G. Moll et van Beck. Les stations choisies étaient deux collines, Kooltjesberg et Zevenboompjes, aux environs d'Utrecht. Résultat obtenu : $332^{m},049$ par seconde, (réduction de la température à 0°).

Franklin, Parry et Forster firent des observations dans les 140 régions arctiques, particulièrement à l'île de Melville et au fort Bowen (à 73° 13 lat. boréale et 88° 54 longit. occidentale de

Greenwich). On avait d'abord pensé que la vitesse du son devait être plus grande dans ces régions glacées que dans les climats tempérés. Mais la moyenne de toutes les observations faites par Franklin, Parry et d'autres dans les contrées polaires s'éloigne d'une quantité insignifiante du résultat général des expériences faites en France, en Hollande et en Angleterre, comme l'a démontré Moll. Ce résultat à été évalué par Muncke
150 à $332^{m},15$ par seconde sexagésimale (à 0° du therm. centigrade, et état moyen du baromètre et de l'hygromètre).

D'autres observateurs firent voir que si la vitesse du son ne change pas sensiblement avec la latitude, elle est à peu près insensible suivant l'altitude des lieux. Ainsi, par exemple, entre le sommet et la base du Faulhorn, dans les Alpes Bernoises, la vitesse du son est la même, peu importe que le son se propage de bas en haut ou de haut en bas, comme le constatèrent, en 1844, MM. Bravais et Martins.

L'idée de mesurer la vitesse du son dans des gaz autres que
160 l'air conduisit Daniel Bernoulli et Chladni à se servir de tuyaux d'orgue pour trouver cette vitesse. Leur procédé consistait à fair vibrer longitudinalement une verge métallique, à déterminer le son qu'elle produit, et à chercher ensuite quelle longueur doit avoir le tuyau d'orgue qui produit le même son. La vitesse du son, dans chacun de ces corps, était en raison inverse de leur longueur.

Mais les vibrations dans les tuyaux d'orgue présentaient des causes d'erreur (les nœuds et les ventres de ces vibrations ne se forment pas aux endroits précis que la théorie leur assigne),
170 que Dulong parvint à éliminer par un artifice très simple. Le fond de cet artifice consistait à employer un tuyau cylindrique très étroit, et à introduire dans le bout opposé à l'embouchure un piston à tige divisée que l'on pouvait enfoncer à volonté et dont on mesurait la course par la division qu'il portait. Pour opérer dans des gaz, Dulong plaçait le tuyau horizontalement dans une caisse en bois doublée de plomb. La course du piston, passant dans une boîte à étoupes, se mesurait comme pour l'air; l'embouchure communiquait avec un réservoir contenant le gaz qui devait produire le son.

Les principaux résultats, obtenus par une série d'expériences, 180
sont que, la vitesse du son étant, dans l'air, de $333^{m},000$ par seconde elle est dans l'hydrogène, le plus léger des gaz, de $1269^{m},50$, tandis que dans l'acide carbonique, l'un des gaz les plus lourds, elle n'est que de $261^{m},60$. Dans les autres gaz (oxygène, oxyde de carbone, protoxyde d'azote, gaz oléfiant), elle est intermédiaire entre ces deux extrêmes. Voyant que le son se propage dans l'hydrogène quatre fois plus vite que dans l'air, on s'est demandé s'il n'y aurait pas là un moyen facile de trancher la question de la réfraction du son. M. Sondhaus démontra en effet, à l'aide d'un appareil fort simple (une lentille biconvexe 190
en baudruche remplie d'hydrogène, et où le son se concentre en un foyer), que le son se réfracte et se rapproche de la normale quand il passe de l'air dans hydrogène.

HOEFER, *Histoire de la Physique.*

INTERFÉRENCES DU SON.

Jusqu'à présent, nous avons considéré le cas simple des ondes sonores se propageant isolément dans les milieux élastiques; plaçons nous dans un cas plus compliqué. Supposons que des ondes sonores cheminant dans l'air et émanant d'un même centre d'ébranlement rencontrent sur leur route des obstacles, deux murs plans, par exemple, formant entre eux un angle plus ou moins obtus; ces murs donneront naissance, comme nous l'avons vu, à deux systèmes d'ondes réfléchies qui seront dans les mêmes conditions que s'ils émanaient chacun d'un centre sonore, distinct, situé derrière l'obstacle. Les ondes réfléchies 10
rencontreront dans l'air l'onde incidente, et se croiseront aussi entre elles. Ne parlons que de ces dernières; que résultera-t-il de leur entre-croisement? Évidemment, une molécule d'air placée sur leur trajet ne pourra prendre exclusivement ni l'une ni l'autre des vitesses que lui apportent les deux ondes qui l'atteignent à la fois; elle acquerra une vitesse unique qui sera la résultante des deux vitesses apportées par les ondes réfléchies. Or plusieurs cas doivent se présenter: 1° Il pourra se faire que

la molécule considérée soit placée à égale distance des deux
20 centres sonores virtuels engendrés par la réflexion du son, centres qui envoient des ondulations de même période, et alors les vitesses communiquées à la molécule seront égales et de même signe ; elles s'ajouteront, c'est-à-dire qu'au point dont il s'agit il y aura renforcement du son. Ou bien : 2° la molécule d'air sera placée à des distances des centres sonores différant entre elles d'un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation ; et encore cette fois, comme cela résulte de ce qui a été dit, les vitesses s'ajouteront, et le renforcement aura lieu. Ou bien, enfin : 3° la molécule gazeuse, dont il est question, sera séparée
30 des deux centres, par des distances qui différeront d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde, et cette fois les vitesses communiquées seront égales et de signe contraire ; elles s'annuleront, et il y aura par suite destruction du son. Nous arrivons donc à ce résultat remarquable qu'il doit exister, en avant des deux obstacles, des séries de points où le son passe alternativement par des maxima ou des minima d'intensité. Ce phénomène porte le nom d'interférences du son.

Expériences de Savart et de Seebeck.—L'expérience a parfaitement justifié ces indications de la théorie ; Savart a étudié
40 les interférences provenant de la rencontre des ondes directes et des ondes réfléchies par un grand mur vertical ; et il a reconnu, en tâtonnant et par le seul secours de l'oreille, l'existence de nœuds et de ventres alternatifs dans la masse d'air placée en avant de l'obstacle. Seebeck a employé, dans le même but, le pendule acoustique déjà décrit.

Expérience de M. Desains.—Les interférences du son se manifestent tout aussi bien par l'emploi seul d'ondes directes, sans recourir aux ondes réfléchies. A cet effet, M. P. Desains a imaginé la disposition suivante. Au centre d'une caisse paral-
50 lélipipédique en bois, dont les parois intérieures sont garnies de ouate, aboutit l'embouchure d'un fort sifflet mis en activité par une soufflerie. Les ondes sonores produites par les vibrations de l'instrument sortent en même temps de la caisse par deux ouvertures circulaires pratiquées à sa paroi supérieure, et symétriquement placées par rapport au sifflet. Dans ces con-

ditions, on a, se propageant au sein de l'atmosphère extérieure, deux systèmes d'ondes directes possédant exactement la même tonalité, et pouvant cependant être considérées comme émanant de deux centres distincts : les deux orifices circulaires dont nous venons de parler. Les circonstances nécessaires à la production du phénomène des interférences sont réalisées ; ces interférences doivent se produire. En effet, une membrane tendue sur un cadre et saupoudrée d'un peu de sable qu'on porte en divers points du plan vertical passant par les deux orifices, montre bien, par les alternatives de sautillement et de repos de la poussière qui la recouvre, l'existence des ventres et des nœuds alternatifs.

Méthode des flammes manométriques pour étudier les vibrations des tranches gazeuses dans les tuyaux sonores.—M. Kœnig a imaginé un moyen très simple de rendre visible l'état vibratoire des différentes tranches de la colonne d'air contenue dans les tuyaux sonores. Il pratique dans l'une des parois latérales du tuyau ouvert trois orifices, l'un au premier quart, l'autre au milieu, l'autre au troisième quart de la longueur du tuyau. Ces orifices sont ensuite fermés à l'aide d'une membrane mince tendue sur le fond inférieur d'une petite caisse cylindrique ou capsule percée de deux trous à sa base opposée. Par l'un des trous arrive le gaz de l'éclairage, par l'autre le gaz s'échappe et va brûler à l'extrémité d'un petit bec. Quand le tuyau ne parle pas, les trois flammes sont immobiles. Mais dès qu'il rend le son fondamental, et que par suite il se produit en son milieu un nœud de vibration, on voit la flamme médiane s'allonger et se raccourcir alternativement. Son mouvement rapide de va-et-vient persiste, tant que le son fondamental est maintenu. Les deux autres flammes ne participent que faiblement à cette agitation. Ce sont évidemment les dilatations et les condensations successives de l'air dans la région du nœud, qui, se transmettant au gaz de la capsule, par l'intermédiare de la membrane élastique dont est formé le fond de cette capsule, déterminent les oscillations de la flamme.

Si, en augmentant la vitesse du courant d'air dans le tuyau, on

lui fait rendre l'octave du son fondamental, on voit aussitôt la flamme médiane reprendre son immobilité normale, tandis que les deux autres se mettent en vibration. Les nœuds sont, en effet, placés cette fois au premier et au troisième quart du tuyau, et au milieu se trouve un ventre. Dès lors, l'air, dans la région médiane, n'éprouve que des déplacements dans le sens de l'axe, et sa densité ne se trouve en rien modifiée.

Lorsqu'on règle à l'avance le courant de gaz de l'éclairage de 100 façon à n'obtenir que des flammes très petites, on constate que la flamme du milieu s'éteint seule quand on produit le son fondamental. L'extinction des deux autres a lieu, au contraire, quand le tuyau donne l'octave.

Applications.—Emploi des tuyaux sonores en musique.—Tuyaux à embouchure de flûte.—La théorie des tuyaux sonores nous permet de comprendre l'emploi des instruments à vent en musique. Tantôt le mode de production du son à l'entrée du tuyau est celui que nous avons décrit plus haut. L'air chassé par une soufflerie ou par la bouche vient se briser contre l'arête d'un biseau, et ébranle ainsi la colonne gazeuse intérieure. Tel 110 est précisément le système adopté dans le flageolet, la flûte et dans quelques-uns des tuyaux qui composent un buffet d'orgue. Dans le flageolet, le biseau est apparent; dans la flûte il est représenté par le bord d'un trou elliptique contre lequel vient se briser une lame d'air amincie par les lèvres de l'instrumentiste. Les ouvertures convenablement espacées que portent les deux instruments, sont ouvertes ou fermées, en temps utile, par les doigts du musicien ou à l'aide de clefs métalliques. Elles sont destinées à faire naître un *ventre*, en un point déterminé de la 120 colonne d'air, et par suite à faire varier la hauteur du son. Dans l'orgue, les tuyaux sont à sons fixes, aussi faut-il un tuyau pour chaque note. On arrive à produire cette grande variété de sons que réclame l'exécution musicale, en se servant dans les jeux d'orgue à la fois de tuyaux ouverts et de tuyaux fermés. On appelle ces derniers des *bourdons*.

Tuyaux à anche.—Tantôt la masse d'air est mise en vibration dans les tuyaux, par l'intermédiaire d'une lame élastique de bois ou de métal qui oscille sous l'influence du courant gazeux, dans

un orifice qu'elle ouvre et ferme alternativement. Le courant gazeux arrivé dans le porte-vent s'échappe dans l'atmosphère en 130 chassant devant lui la languette, qui, en vertu de son élasticité, revient bientôt dans sa position première et exécute dès lors un mouvement rapide de va-et-vient. Il en résulte une série continue de chocs alternatifs de l'air insufflé contre la colonne d'air extérieur habituellement renfermée dans un tube ouvert aux deux bouts qu'on nomme un *cornet*. Le tuyau dans lequel le son est ainsi produit se nomme tuyau à *anche*. Comme la hauteur du son dépend de la longueur de la partie vibrante de la languette élastique; on règle à volonté cette longueur, à l'aide d'une tige rigide, la *rasette*, qui rend immobile par sa rigidité les 140 points de la lame contre lesquels elle s'appuie.

L'anche peut être libre ou battante; dans le premier cas, la lame oscillante rase les bords de l'orifice sans les toucher; dans le second, elle est un peu plus large que l'ouverture et frappe contre les bords de la caisse qu'elle ferme d'une manière intermittente. Cette dernière circonstance donne aux sons produits par l'anche battante le timbre nasillard qui les caractérise.

La clarinette est un instrument à anche battante: les lèvres de l'exécutant, en pressant en tel ou tel point de la languette 150 mobile, font l'office de la rasette. Le hautbois et le basson appartiennent au même groupe. Dans le cor, le cornet à piston et dans la plupart des instruments de cuivre employés par les musiques militaires, ce sont les lèvres du musicien qui jouent le rôle de l'anche et qui par leurs vibrations représentent la cause productrice du son. La colonne d'air qui doit vibrer dans le long tuyau de ces différents instruments est tantôt variable de longueur comme dans le cornet à piston; et tantôt, elle conserve une longueur constante et se divise alors spontanément en plusieurs tronçons vibrant séparément. Ce fractionnement 160 spontané de la colonne gazeuse permet d'obtenir les diverses notes de la gamme. Pour le cor en particulier ce sont les harmoniques 8, 9, 10, etc., répondant aux sens successifs d'une même gamme, qui sortent plus facilement. Le *fa* et le *la* de cette gamme ne correspondent pas exactement aux harmoniques

11 et 13, ils sont obtenus justes, en plaçant la main dans le pavillon de l'instrument.

Premières notions sur le timbre.—Deux instruments de musique peuvent donner la même note musicale, la produire
170 avec la même intensité, et cependant faire naître en nous des impressions différentes. Tout le monde distingue les sons d'une flûte en cristal de ceux d'une flûte en ébène. Les instruments à cordes donnent aux sons qu'ils font entendre un caractère particulier qui ne permet pas de les confondre avec ceux des instruments de cuivre. Cette qualité spéciale, qui différencie les sons les uns des autres, en dehors de l'intensité et de la hauteur, porte le nom de *timbre.*

Quelle est l'origine du timbre?—Ne semble-t-il pas naturel d'admettre qu'un mouvement vibratoire, un mouvement pendu-
180 laire est complètement défini, lorsqu'on connaît la durée de la vibration et son amplitude? Ceci serait incontestable, si l'on avait toujours à percevoir des sons simples tels que nous les avons supposés jusqu'à présent. Mais, au lieu de cela, l'oreille peut être impressionnée par un ensemble de sons simples simultanés dont l'un, beaucoup plus intense que tous les autres, donne une sensation dominante, d'une hauteur déterminée. Dans ces conditions nouvelles, l'action subie par le nerf auditif ne dépendra plus seulement de la durée et de l'amplitude de l'oscillation correspondante au son principal. Il faudra, pour caractériser
190 nettement ce nouveau mouvement oscillatoire, connaître un élément de plus. Il faudra savoir quels sont les mouvements *simples, semblables individuellement* à ceux *qu'accomplit* l'extrémité d'un pendule dans ses petites oscillations qui, en se combinant ensemble, engendrent le mouvement vibratoire complexe dont il s'agit.

Dans une série de sons produits successivement et ayant chacun une origine différente, le son principal, celui qui détermine l'acuité, aura beau être le même; suivant que les sons accessoires qui se superposent à lui, dans chaque cas, varieront
200 de nature et d'intensité, l'organe de l'ouïe devra éprouver des impressions différentes. Alors, tout en attribuant une tonalité

identique aux divers sons qu'elle perçoit successivement, l'oreille leur trouvera des différences, parce qu'ils ne seront pas constitués exactement par les mêmes éléments simples. Ces différences, peut-être difficiles à bien définir, n'en seront pas moins pour nous très appréciables.

Cette complexité du son musical, cette superposition de mouvements vibratoires secondaires à un mouvement vibratoire principal, est précisément la cause du timbre. Il dépend, comme nous allons le démontrer, de la nature, du nombre et de l'intensité 210 relative des notes harmoniques qui accompagnent la note fondamentale.

C'est surtout aux importants travaux de M. Helmholtz qu'on doit l'élucidation à peu près complète de cette question. Il a procédé successivement par analyse et par synthèse.

Mécanisme de l'Oreille.

Usages des diverses parties de l'oreille.—Maintenant que nous connaissons la disposition anatomique des organes compliqués qui servent d'instrument au sens de l'ouïe, nous pouvons essayer d'en apprécier le rôle et le mécanisme.

Les usages de l'oreille externe sont évidents, et les courbures 220 de ses diverses parties semblent destinées à réaliser cette condition : que la conque ait toujours une partie de sa surface interne placée sur le trajet des ondes sonores ; ces dernières peuvent alors être réfléchies dans une direction convenable jusque sur la membrane du tympan. Il paraît, en effet, que chez l'homme, une inclinaison ou plutôt un écartement du pavillon coïncide avec une grande finesse de l'ouïe. Quoi qu'il en soit de cette observation, chacun sait que les animaux craintifs ou nocturnes ont ces parties extrêmement développées ou très mobiles. Chez certaines chauves-souris, les dimensions du pavillon sont 230 énormes ; et nous voyons tous les jours des animaux qui ont la faculté de diriger l'ouverture de l'oreille externe vers le côté d'où vient le bruit.

Les flexuosités et la courbure vers le haut du conduit auditif externe ne paraissent avoir d'autre but que de s'opposer à

l'introduction des corps étrangers. D'après Muller, ce conduit
serait destiné à renforcer les sons : il faut remarquer en effet que
la disposition infundibuliforme a pour résultat, comme dans un
porte-voix, de concentrer sûrement les ondes sonores sur un
240 espace de plus en plus petit. Ajoutons que l'oreille externe
offre une sensibilité très marquée et qu'elle représente ainsi une
avant-garde contre les objets extérieurs.

La membrane du tympan, nous l'avons vu, s'insère oblique-
ment dans le conduit auditif ; cette disposition a d'abord l'avan-
tage d'éviter l'action brusque et directe des corps étrangers qui
pénètrent dans l'oreille. En outre, grâce à cette obliquité, la
partie terminale du conduit auditif externe, qui n'a guère que 7
ou 8 millimètres de diamètre, est fermée par une membrane qui
mesure, à son point d'insertion, un diamètre de 10 ou 11 milli-
250 mètres. La différence est sensible, on le voit, et les naturalistes
ont établi que, toutes choses égales d'ailleurs, la perfection du
sens de l'ouïe est en rapport direct avec la surface et avec
l'obliquité de cette membrane.

Si la membrane du tympan servait de paroi à une caisse vide
ou remplie par un gaz complètement emprisonné entre des
parois résistantes, il est certain qu'elle ne vibrerait pas, ou
qu'elle vibrerait mal. Aussi faut-il bien se pénétrer de cette
idée que les deux faces de la membrane sont accessibles à l'air,
sont soumises à la même pression, et que les ondes sonores
260 peuvent se transmettre aussi bien par le conduit externe que par
la trompe d'Eustache. Toutefois, les dimensions restreintes de
ce dernier canal, sa position dans l'arrière-cavité des fosses
nasales, et par conséquent son rapport avec de l'air, dont les
vibrations se sont amorties sur des contours déjà nombreux,
tout cela, disons-nous, n'en fait pas le conduit ordinaire des
ondes sonores, mais seulement une ouverture destinée au
maintien d'une pression toujours égale à la pression atmos-
phérique. L'expérience prouve d'ailleurs que si l'on bouche
les oreilles avec le doigt, on perçoit fort bien un son émis avec
270 la bouche fermée ; et, d'autre part, l'observation médicale a
établi que l'occlusion de la trompe d'Eustache coïncidait avec
une certaine dureté de l'ouïe.

L'oreille moyenne a pour usage, non pas seulement de

transmettre les vibrations, mais elle est encore un appareil de perfectionnement dans lequel les sons sont atténués ou renforcés. Elle manque chez tous les invertébrés, et même chez les vertébrés à respiration branchiale, et c'est elle qui donne aux animaux supérieurs la faculté d'apprécier la valeur exacte des sons. Ce rôle important est rempli par les divers organes qui constituent la caisse du tympan, membranes et osselets; il est rempli encore 280 par des prolongements considérables, variables d'étendue et de forme, qui, sous le nom de Cellules mastoïdiennes, s'étendent dans l'épaisseur de l'os temporal. Chez l'homme, cet agrandissement des cavités a déjà son importance; mais chez les oiseaux, les ruminants, etc., ces cavités se prolongent jusque dans l'os occipital, et offrent un développement très notable.

La chaîne des osselets présente des flexuosités, et fait l'effet d'un ressort destiné à transmettre, avec tous les ménagements désirables, les vibrations sonores. Les muscles, qui les font mouvoir, ont pour action secondaire, nous l'avons dit, de tendre 290 ou de relâcher la membrane du tympan et de la rendre ainsi parfaitement apte à vibrer à l'unisson de tous les sons qui viennent de l'extérieur. Ces muscles sont soumis jusqu'à un certain point à l'empire de la volonté; quelques personnes ont la faculté de les faire mouvoir, et de produire ainsi un léger bruit dans leur oreille; mais chez tous, ils sont soumis à l'action réflexe, c'est-à-dire qu'ils agissent instantanément pour répondre aux provocations extérieures, sans l'intermédiaire de la volonté. L'utilité de ces muscles est très grande; à part la finesse du sens auditif qu'ils favorisent au plus haut point, ils relâchent la 300 membrane dans le cas des impressions trop vives et évitent ainsi sa rupture. On a vu en effet des coups de canon tirés à l'improviste et avant que la membrane eût acquis la distension nécessaire, déterminer la déchirure de cet organe.

Du reste, ces divers organes sont utiles, mais non indispensables; la perte ou la déchirure du tympan, l'absence des osselets, n'entraînent pas la surdité complète.

Nous avions donc raison de dire en commençant que l'organe seul essentiel est l'oreille interne et même le vestibule. Chez les crustacés et les céphalopodes, le vestibule forme seul le sens 310 de l'ouïe. Les autres parties du labyrinthe lui-même n'apparais-

sent que successivement dans les êtres plus élevés de l'échelle animale pour n'être complètes que chez les mammifères.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.*

D.—CHALEUR.

LE THERMOMÈTRE.

L'invention et les perfectionnements du thermomètre devinrent le point de départ ou l'occasion de recherches multipliées sur la chaleur. C'est autour de cet instrument que sont venus successivement se grouper les principaux *faits thermologiques.*

François Bacon tira de ses observations thermométriques la conclusion que l'air est plus sensible à la chaleur et au froid que la peau de notre corps. Il remarqua aussi que les métaux incandescents ne perdent rien de leur poids, ni de leur substance, en échauffant les corps environnants, et que par l'action de la
10 chaleur l'air se dilate plus que les liquides, et que ceux-ci se dilatent plus que les corps solides. Il revient souvent sur ce fait général, qu'il semble revendiquer comme sa découverte; mais il n'eut point l'idée d'appliquer le même degré de chaleur à des corps différents pris sous un même volume. Il ignorait donc la chaleur spécifique ainsi que la chaleur latente, et il se trompait avec la plupart des physiciens de son temps en prenant la vapeur aqueuse pour une transformation de l'eau en l'air.

Les académiciens de Florence montrèrent les premiers par des expériences faites avec des tiges creuses que le verre et les
20 métaux se dilatent par l'action de la chaleur; mais ils ne cherchèrent point à s'assurer de combien chacune de ces substances se dilate. Voici, entre autres, une expérience qui mit ces mêmes académiciens dans un grand embarras: le thermomètre, plongé dans de l'eau contenant des fragments de glace, marquait toujours le même degré, quelle que fût la quantité d'eau bouillante ajoutée à l'eau glacée. Cette expérience, souvent répétée, donna constamment le même résultat: le

thermomètre ne bougeait pas tant qu'il restait une parcelle de glace à fondre. Il leur fut impossible d'expliquer ce phénomène d'une manière satisfaisante, et ils durent renoncer à se servir 30 de la fameuse *antipéristase* des physiciens, théorie d'après laquelle le chaud et le froid, se combattant réciproquement, seraient des qualités contraires, inhérentes à la matière. C'était à l'époque où régnaient dans les écoles les *qualités occultes.*

On savait depuis longtemps que beaucoup de corps solides fondent par la chaleur et que par le refroidissement ils reprennent leur premier état. Boyle généralisa ce fait, en soutenant que la congélation des liquides et la solidification des corps fondus étaient le même phénomène, seulement à des degrés de chaleur différents. Il n'alla pas jusqu'à généraliser de même le fait 40 particulier de la glace fondante, à savoir, que pendant la fusion d'un corps quelconque la température demeure constante.

La vaporisation des corps, particulièrement des liquides, sous l'influence de la chaleur, était un fait connu de temps immémorial. Mais les physiciens essayèrent en vain de l'expliquer. L'explication donnée par Descartes est purement imaginaire. Ce grand philosophe fait intervenir une « matière subtile, qui est, dit-il, dans les pores, estant plus fort agitée une fois que l'autre, soit par la présence du soleil, soit par telle autre cause. . . . Ainsi que la poussière d'une campaigne se soulève, quand 50 elle est seulement agitée par les pieds de quelque passant ; car encore que les grains de cette poussière soient beaucoup plus gros et plus pesants que les particules du corps vaporisé, ils ne laissent pas pour cela de prendre leur cours vers le ciel, ce qui doit empêcher qu'on s'étonne de ce que l'action du soleil élève assez haut les particules de la matière, dont se composent les vapeurs et les exhalaisons. »

Dechales réfuta cette opinion de l'auteur du *Discours de la méthode* et montra qu'on pourrait très bien expliquer le phénomène en question en admettant qu'à l'état de vapeur un 60 corps occupe un bien plus grand espace qu'à l'état liquide. « Prenez, dit-il, par exemple, une parcelle d'eau ayant le millième du poids d'une livre ; si elle est atténuée par l'action de la chaleur au point d'occuper un espace plus grand qu'une masse

d'air du même poids, elle s'élèvera dans l'atmosphère suivant
les lois hydrostatiques.»

Le même auteur donne ensuite une autre explication, à
l'usage de ceux qui voudraient nier qu'un même corps puisse
être forcé à occuper plus d'espace. En prenant le même
70 exemple, on pourrait, dit-il, supposer entre les parcelles infini-
ment petites (atomes) de l'eau l'existence d'une matière très
subtile, élastique, impondérable (éther), et que c'est cette
matière qui viendrait remplir l'espace que les petites parcelles
pesantes auraient laissé par leur écartement.

Les physiciens partisans des qualités occultes de la matière
prétendaient expliquer la force ascensionnelle de l'eau à l'état
de vapeur en imaginant une *légèreté positive* qui, en se com-
binant avec les atomes, aurait pour effet de rendre les corps
spécifiquement plus légers que l'air. Cette hypothèse fut réfutée
80 par Borelli et Boyle.

Vers la même époque (entre 1650 et 1660), on découvrit un
fait important, celui de l'action que *la pression atmosphérique
exerce sur le point d'ébullition des liquides.* On trouve les
premières traces de cette découverte dans les *Nova Experimenta
physico-mechanica de vi aeris elastica ; exper.* XLIII, de Boyle.
Ce grand physicien avait fait bouillir de l'eau pour en chasser
l'air. Voulant soumettre ensuite cette eau refroidie à l'ex-
périence du vide, il en plaça une partie dans une petite fiole
sous le récipient de la machine pneumatique. Après quelques
90 coups de piston de la machine, l'eau se mit à bouillir avec force,
à la grande surprise des assistants. L'ébullition ayant cessé,
quelques nouveaux coups de piston la firent recommencer de
bouillir. Enfin il fut constaté qu'au dehors de la machine
pneumatique on ne pouvait faire bouillir l'eau que par l'applica-
tion de la chaleur. «Ces expériences démontrent, conclut
Boyle, que l'air peut, par sa pression plus ou moins forte,
modifier beaucoup d'opérations, de telle manière que si nous
chauffions des corps dans les régions supérieures de l'atmos-
phère, nous obtiendrions des résultats tout différents de ceux
100 obtenus dans les régions inférieures.» La voie était ouverte ;
les physiciens n'avaient qu'à la suivre.

Quelques années plus tard, Huyghens et Papin répétèrent, avec le même succès, les expériences de Boyle. En 1724, Fahrenheit fit un pas de plus, et voici dans quelles circonstances. Nous avons vu comment les membres de l'Académie *del Cimento* avaient trouvé que la colonne thermométrique se maintient invariablement au même point dans l'eau où il reste encore une parcelle de glace à fondre, fait précieux pour la détermination de l'un des points fixes de l'échelle thermométrique. L'observation des académiciens de Florence fut complétée 110 par Halley. Ce physicien astronome fit, en 1693, des expériences nombreuses sur la dilatabilité des liquides dans le but de perfectionner le thermomètre. Il remarqua que l'eau se dilate beaucoup plus près de son point d'ébullition qu'à une certaine distance de ce point, et qu'une fois entrée en ébullition, sa température ne s'élève plus, et qu'elle demeure fixe, tant qu'il reste une goutte d'eau à réduire en vapeur. Le même fait fut constaté, en 1702, par Amontons, sans que le physicien français ait eu connaissance du travail antérieur du physicien anglais. Amontons fit particulièrement ressortir l'importance de ce fait 120 pour la détermination du second point fixe de l'échelle thermométrique.

C'est là que la question fut reprise par Fahrenheit. Averti par les expériences de Boyle, il pensa qu'il ne suffisait pas de se borner à la simple fixation du point d'ébullition, mais qu'il fallait encore tenir compte de la pression atmosphérique, indiquée par le baromètre. Après avoir constaté que sous une pression plus forte que celle qui correspond à 28 pouces de la colonne barométrique, l'eau exige une température plus élevée que sous une pression plus faible, Fahrenheit proposa 130 de ramener toujours à la pression de 28 pouces (un peu moins que 76 centimètres) la détermination du second point fixe du thermomètre. Tout cela prouve, une fois de plus, que si la continuité est l'essence même de la nature, les phénomènes ne se présentent à nos moyens d'observation qu'isolément ou d'une manière discontinue.

Deluc (né à Genève en 1727, mort a Windsor en 1817), dans ses *Recherches sur les modifications de l'atmosphère*, fit une

étude particulière du point d'ébullition de différentes eaux, à
140 des hauteurs différentes. Il trouva que les eaux de pluie, de
rivière et de source ont, à hauteur égale, le même point
d'ébullition, et il proposa de se servir de l'eau de pluie pour
marquer, sur le thermomètre, le second point fixe, en recommandant d'introduire dans l'eau bouillante tout à la fois la
boule et le tube de l'instrument. Il remarqua aussi que l'eau
saturée de sel marin exige jusqu'à 7 degrés de Réaumur de plus
pour entrer en ébullition.

Le Monnier observa, le 6 octobre 1739, que son thermomètre
de Réaumur, qui avait été construit à Perpignan, le baromètre
150 étant à $28\frac{1}{6}$ pouces, marquait 9 degrés au-dessous du point
d'ébullition, lorsqu'il le plongeait dans l'eau bouillante au
sommet du Canigou. De Luc continua ce genre d'observations.
En 1762, allant de Genève à Gênes, il nota la température de
l'eau bouillante dans dix localités différentes, et, pendant son
voyage de retour, dans seize localités; il se servait pour cela
du même thermomètre, et mesurait avec un fil l'intervalle compris entre le degré de la glace fondante et celui de l'eau
bouillante. En comparant ces observations entre elles, il trouva
que les différences du point d'ébullition ne sont pas proportion-
160 nelles aux différences de la hauteur barométrique. Il n'osa
donc pas formuler une loi générale; il se borna à établir que
l'abaissement d'une ligne de la colonne barométrique fait descendre, en général, le point d'ébullition de $\frac{96}{133\frac{1}{4}}$ ou de 0·72
de l'échelle thermométrique (de Deluc), divisée en 816,8
parties. Mais chaque fois qu'il reprenait ses observations pour
contrôler ce qu'il avait essayé d'établir, il obtenait des résultats
sensiblement différents; c'est ce qui lui arriva notamment,
en 1765, pendant une excursion dans les montagnes du
Faucigny. La commission de la Société royale de Londres ne
170 parvint pas davantage à des résultats concordants.

La cause de ces variations ne fut découverte qu'une cinquantaine d'années plus tard par Gay-Lussac. Ce physicien-chimiste
constata que la substance du vase dans lequel on fait bouillir
l'eau exerce une certaine influence sur la température de

l'ébullition. Dans des vases de verre, il trouva que la température de l'eau bouillante s'était élevée à 101°,232 du thermomètre centigrade. En mettant du verre pilé très fin dans le même vase, il vit la température descendre à 100,329.

L'étude de ces oscillations a été reprise de nos jours par M. Marcet, qui montra qu'elles atteignent une intensité spéciale 180 pour chaque substance où l'eau est mise en ébullition, par M. Donny de Gand et par M. L. Dufour, prouvant expérimentalement que les bulles de vapeur qui déterminent l'ébullition ne se produisent qu'à une température très élevée au contact d'un verre bien décapé. On a montré aussi qu'en dégageant subitement des gaz au sein de l'eau par un courant électrique entre deux pointes de platine, on détermine tout à coup l'ébullition du liquide.

Par l'ensemble de ces expériences, dont les plus anciennes remontent à environ deux siècles, on est parvenu à établir 190 comme un fait général (qu'on appellerait à tort une *loi*) que l'ébullition a lieu au moment où la vapeur atteint une tension maximum égale à la pression qui est exercée sur l'eau, et qu'en dernière analyse « l'ébullition n'est qu'une évaporation intérieure commençant en un point de la paroi chauffée, où l'adhérence est la plus faible, et se continuant dans l'intérieur de la bulle une fois que celle-ci est née; le mouvement ascensionnel des bulles qui courent à la surface n'est que l'accessoire.»

Les observations thermométriques remirent sur le tapis la question du *froid* et du *chaud*, qui défrayait jadis les discussions 200 des physiciens. Les sensations variables que chacun éprouve non-seulement dans les différentes saisons de l'année, mais encore dans les différents moments de la journée, auraient dû déjà les convaincre que le froid n'a en lui-même aucune valeur réelle, qu'il n'est qu'une chaleur relative. Ce qui les faisait hésiter, c'est l'action *frigorifique* attribuée à certains sels, tels que le nitre et le sel ammoniac. Mariotte assigna au problème ses véritables limites. Il montra que ce n'est point par la sensation du froid que nous devons juger si une chose est sans chaleur, mais par des raisonnements fondés sur les effets 210 physiques de la chaleur. « Pour mieux raisonner sur cette

matière, il faut, dit-il, remarquer que la plupart des qualités qui nous semblent contraires, ne sont rien en réalité, mais seulement une privation ou manquement de ces qualités . . . Il est aisé de juger que la qualité qui est contraire à la chaleur doit suivre la même règle, et que le froid parfait n'est autre chose qu'une privation de chaleur, d'autant que le mouvement est le seul principe, ou du moins un des principes de la chaleur, comme on le reconnaît par l'expérience des roues de carrosse
220 qui s'allument en roulant violemment, et que les effets doivent être proportionnés à leurs causes. Si le mouvement a pour son contraire le repos, qui est une privation, le contraire de chaleur, qui est le froid, sera aussi une privation, et si les corps ne sont chauds que par un mouvement violent de leurs particules (atomes), il s'ensuit nécessairement que lorsque leur mouvement cesse, ils demeurent froids et sans chaleur. Mais, comme l'aiguille d'une montre nous paraît sans mouvement, parce qu'elle tourne très lentement, ainsi un corps, qui a fort peu de chaleur nous doit paraître comme s'il n'en avait point du tout.»

230 Abordant ensuite le vif de la question, Mariotte ajoute « que si on insiste et qu'on objecte que le froid agit, puisqu'il engourdit et fait mourir les animaux, qu'il durcit les eaux et fait fendre les arbres, et que par conséquent ce n'est pas une privation, on pourra répondre que ce que nous souffrons par le froid procède de ce que notre chaleur naturelle se dissipe par l'attouchement des choses beaucoup moins chaudes que nous; car les qualités se communiquent et passent d'un sujet en un autre, comme une boule qui roule, rencontrant une pierre immobile, lui communique une partie de son mouvement qu'elle
240 perd.»

Mariotte cite comme un exemple de l'erreur du jugement, fondé uniquement sur les sens et non corrigé par le raisonnement, la croyance commune que les caves sont plus froides l'été et plus chaudes l'hiver; il attribue très bien ce fait à ce que la température varie beaucoup moins à une certaine profondeur qu'à la surface du sol. « Pendant les premières chaleurs de l'été, quand même, dit-il, elles seraient très grandes, les caves très profondes doivent être moins échauffées qu'au commence-

ment de septembre, parce que la chaleur s'insinue peu à peu dans la terre, et qu'il faut beaucoup de temps avant qu'elle ait 250 pénétré jusqu'à 30 ou 40 pieds de profondeur; car même lorsque le soleil luit tout le jour, la surface de la terre est plus échauffée à trois heures après midi qu'à dix ou onze heures du matin, et il fait ordinairement moins chaud au solstice d'été qu'un mois ou six semaines après, et par la même raison la plus grande chaleur des caves profondes doit être vers la fin de l'été, et le plus grand froid vers la fin de l'hiver.» A l'appui de cela, l'auteur expose une série d'observations thermométriques, qu'il avait faites pendant trois années consécutives (de 1670 à 1673) dans les caveaux de l'observatoire de Paris. 260

L'abbé Teinturier, de Verdun, contemporain de l'abbé Mariotte, avait fait une expérience dont l'explication embarrassait singulièrement les physiciens. Cette expérience consistait à entourer le thermomètre, au moyen d'un soufflet, de forts courants d'air. Pendant que ces courants déterminaient sur la peau une sensation de froid, ils avaient, contrairement à ce qu'on en devait attendre, pour effet de faire monter très sensiblement la colonne du liquide thermométrique. Cassini répéta l'expérience de l'abbé Teinturier, et obtint constamment le même résultat. Ce physicien astronome y vit la confirmation 270 de l'hypothèse de la chaleur-mouvement: l'air agité par le soufflet produit, se disait-il, en réalité, de la chaleur, bien que la peau n'en reçoive qu'une sensation de froid, due à ce que l'air ambient, toujours d'une température inférieure à celle de notre corps, se renouvelle rapidement, et que chaque couche ainsi renouvelée nous enlève une certaine quantité de chaleur.

Cependant les expériences des de la Hire, père et fils, ne s'accordaient pas tout à fait avec celles de l'abbé Teinturier et de Cassini: par l'effet du soufflet, ils voyaient le liquide thermométrique tantôt s'élever, tantôt s'abaisser, tantôt rester station- 280 naire. Ces résultats, en apparence contradictoires, pouvaient s'expliquer par l'action de l'humidité (vapeur aqueuse) déposée sur les thermomètres de différentes sortes dont s'étaient servis les de la Hire.

HOEFER, *Histoire de la Physique.*

Chaleur Latente.

On a lieu de s'étonner qu'aucun des nombreux physiciens qui se sont occupés de la détermination des deux points fixes du thermomètre, n'ait essayé d'expliquer pourquoi la température reste invariable, quelle que soit la quantité de chaleur qu'on applique à la glace fondante ou à l'eau bouillante. Ce n'est qu'en 1762 qu'un physicien-chimiste, Black, essaya le premier de se rendre compte de ce singulier phénomène. Black demanda d'abord, en interrogeant la nature, pourquoi la glace fond si lentement par l'action de la chaleur. Une première expérience lui apprit que, pendant que l'eau à 0° s'élève à la température de 7° (du thermomètre Fahrenh.), la même quantité de glace également à 0° exige, quoique soumise à la même chaleur que l'eau, un temps 21 fois plus long pour arriver à la même température de 7°, soit $7 \times 21 = 147°$, et qu'il y a par conséquent 140 degrés de chaleur absorbés, que le thermomètre n'indique pas. Pour mieux s'assurer de l'absorption ou du recel de la chaleur (*concealment of heat*), Black mêla ensemble quantités égales d'eau chaude et d'eau froide : la température du mélange se trouva être exactement la moyenne entre les températures de l'eau chaude et de l'eau froide. Il fit ensuite d'autres expériences pour montrer que, quand on fait fondre de la glace dans une égale quantité d'eau à 176° (Fahrenh.), le mélange qui en résulte est à peu près à la température de la glace fondante. Cette quantité considérable de chaleur qui disparaît ainsi et que le thermomètre n'indique point, reçut de Black le nom de *chaleur latente* (*latent heat*).

Black fit le même genre d'expériences pour l'eau bouillante : il démontra que pendant la vaporisation il y a une grande quantité de chaleur d'absorbée, laquelle n'est point accusée par le thermomètre, et qu'il arrive ici ce qui se passe pendant la liquéfaction des corps solides. « De même que la glace, combinée avec une certaine quantité de chaleur, constitue, dit-il, l'eau, ainsi l'eau combinée avec une certaine quantité de chaleur constitue la vapeur.» On voit que, pour Black, la chaleur latente est de la *chaleur de combinaison.*

Bien des hypothèses ont été émises depuis Black sur la chaleur latente. Crawford (né en 1749, mort en 1795), auteur des *Expériences sur la chaleur animale*, suppose que les corps acquièrent plus de capacité pour contenir le calorique au moment où ils passent d'un état à l'autre. Lavoisier regardait 40 cette hypothèse comme inadmissible; « car si elle suffit, dit-il, pour expliquer assez bien les phénomènes qui ont lieu lorsque les corps passent de l'état liquide à l'état aériforme, elle ne fournit pas des explications aussi heureuses lorsqu'il est question du passage des corps solides à l'état liquide. En effet, lorsqu'un corps passe à l'état aériforme, il acquiert un volume beaucoup plus grand que celui qu'il occupait auparavant; on peut donc concevoir qu'il se loge entre ses molécules une beaucoup plus grande quantité de calorique . . . Mais il n'en est pas de même à l'égard des solides qui deviennent liquides: non seulement ils 50 n'augmentent pas tous de volume, mais un grand nombre, au contraire, paraît en diminuer: le calorique ne produit à leur égard ni l'effet d'en élever la température, ni l'effet de les dilater.»

Quelle était l'opinion de Lavoisier? Voici sa réponse: « Je continuerais, dit-il, à regarder la liquéfaction et la vaporisation des corps comme une *dissolution par le calorique*, dissolution analogue, à beaucoup d'égards, à celle des sels par l'eau . . . Cette dissolution des corps par le calorique commence au moment où le corps devient liquide; c'est alors que les molécules attractives des corps solides, se trouvant combinées à une 60 quantité suffisante de molécules répulsives de calorique, tendent à s'écarter les unes des autres, c'est-à-dire à se transformer en un fluide aériforme; . . . et s'il était possible qu'il n'existât pas d'atmosphère, il n'existerait pas de liquides proprement dits.»

D'après la manière de voir qui règne aujourd'hui, les changements d'état d'un corps sont le résultat d'un travail intérieur, moléculaire. C'était là déjà l'idée de Laplace; car voici ce qu'il dit au sujet du passage de la glace à l'eau. « Les molécules de l'eau ont entre elles, dans l'état de glace, une position différente que dans l'état de fluidité; or, si l'on imagine une 70 masse d'eau à une température au-dessous de zéro et que, par une agitation quelconque, on dérange la position de ses molé-

cules, on conçoit que dans cette variété de mouvements quelques-unes d'entre elles doivent tendre à se rencontrer dans la position nécessaire pour former de la glace, et puisque cette position est une de celles où la chaleur est en équilibre, elles pourront la prendre, si la chaleur qui les écarte se répand assez promptement sur les molécules voisines, en sorte que l'état de fluidité de l'eau sera d'autant moins *ferme* que sa température
80 sera plus abaissée au-dessous de zéro.» Puis, généralisant cette manière de voir, Laplace ajoute : « Dans un système de corps animés par des forces quelconques, il y a souvent plusieurs états d'équilibre ; ainsi un parallélipipède rectangle, soumis à l'action de la pesanteur, sera en équilibre sur chacune de ses faces ; on peut l'y concevoir encore en le posant sur un de ses angles, pourvu que la verticale qui passe par son centre de gravité rencontre le sommet de cet angle ; mais cet état d'équilibre diffère des précédents en ce qu'il n'est point ferme, la plus légère secousse suffisant pour le détruire. Cela posé, imaginons
90 en contact deux corps de température différente ; il est visible que la chaleur ne peut se mettre en équilibre que d'une seule manière, savoir, en se répandant dans les deux corps, de sorte que leur température soit la même ; mais si, par une augmentation ou par une diminution de chaleur, les corps peuvent changer d'état, il existe alors plusieurs états d'équilibre ou de chaleur.»

Enfin, le grand physicien-géomètre essaya l'un des premiers à rattacher cette physique moléculaire aux lois générales du mouvement. Voici ses expressions ; elles méritent d'être reproduites : « Dans tous les mouvements dans lesquels il n'y a
100 point de changement brusque, il existe une loi générale que les géomètres ont désignée sous le nom de *principe de la conservation des forces vives* ; cette loi consiste en ce que, dans un système de corps qui agissent les uns sur les autres d'une manière quelconque, la force vive, c'est-à-dire la somme des produits de chaque masse par le carré de la vitesse, est constante. Si les corps sont animés par des forces accélératrices, la force vive est égale à ce qu'elle était à l'origine du mouvement, plus à la somme des masses multipliées par les carrés des vitesses dues à l'action des forces accélératrices. La chaleur

est la force vive qui résulte des mouvements insensibles des 110
molécules d'un corps; elle est la somme des produits de la
masse de chaque molécule par le carré de sa vitesse.» Laplace
fait observer que ce n'est là sans doute qu'une hypothèse, au
même titre que celle qui assimile le calorique à un fluide, mais
qu'il sera facile de faire rentrer la seconde hypothèse dans la
première en changeant les mots de *chaleur libre*, *chaleur combinée*
et *chaleur dégagée*, par ceux de *force vive*, *perte* (absorption) *de
force vive* et *augmentation* (réapparition) *de force vive.*

HOEFER, *Histoire de la Physique.*

FUSION—DISSOLUTION.

Première loi de la fusion.—Température fixe de la fusion.
—La plupart des corps, soumis à une élévation convenable de
température, passent brusquement de l'état solide à l'état liquide,
sans présenter, d'une manière sensible, les états intermédiaires.
La température, que marque le thermomètre en contact avec les
points qui sont actuellement en fusion est, pour chaque corps,
pour chaque espèce chimique, une température déterminée,
invariable sous la même pression: on la nomme *température
de fusion.* Elle a un tel caractère de constance qu'elle permet
de reconnaître la pureté d'une substance. 10

Les divers corps présentent, au point de vue de leur température de fusion, des différences très marquées. On peut dire que,
si on les rangeait en série continue, selon leur plus grande facilité
à se convertir en liquide, on parcourrait, en suivant leurs points
de fusion, tous les degrés de l'échelle thermométrique; ainsi:

L'acide sulfureux fond, ...	à −	100°
L'acide carbonique, ...	−	78
Le mercure, ...	−	40
L'acide hypoazotique, ...	−	9
L'eau, ...		0
Le chlorure de calcium hydraté, . .	à +	29
Le phosphore, ...		44,2
La cire, ...		64
L'acide stéarique, ...		70
Le soufre, ...		115

20

L'étain, ...	228
Le plomb, ...	332
L'antimoine, ...	433
L'argent, ...	1000
30 L'or, ...	1250
Le fer, ...	1500

Enfin, le platine fond à une température qu'on peut évaluer à 2000°, d'après les déterminations récentes de MM. Deville et Debray. Il n'est pas jusqu'au charbon, qu'on avait considéré longtemps comme absolument infusible, qui n'ait semblé se ramollir lorsque Despretz l'a porté à une très haute température.

Les phénomènes, observés depuis longtemps, les résultats nouveaux qui viennent d'être présentés, montrent que les substances qui résistent à la fusion sont de moins en moins 40 nombreuses, à mesure qu'on perfectionne les moyens de produire des températures très élevées. Aussi, quoique la science ne puisse pas, aujourd'hui, amener tous les corps à l'état liquide, on n'en a pas moins le droit de conclure qu'il n'est pas de corps absolument réfractaire: il n'en est aucun qui, porté à une température suffisamment haute, ne soit susceptible de fondre.

Il est bon de remarquer que certains corps solides, lorsqu'on les chauffe, se décomposent au lieu de fondre; tels sont le carbonate de chaux, la cellulose, etc. Toutefois le carbonate de chaux subit la fusion ordinaire, lorsqu'il est chauffé dans un vase 50 hermétiquement clos et à parois résistantes. Le carbonate de chaux, décomposé partiellement par la chaleur, émet de l'acide carbonique; dans l'espace fermé qui le contient, cet acide exerce une pression déterminée à chaque température; le reste du carbonate de chaux, qui n'est pas décomposé, peut subir la fusion et la subit effectivement.

Corps qui deviennent pâteux.—Cependant certains corps solides, soumis à l'action de la chaleur, passent à l'état liquide, en présentant successivement tous les états intermédiaires; le thermomètre indique une élévation continue de leur température. 60 D'abord pâteux, ils deviennent de plus en plus fluides sans que le thermomètre indique de temps d'arrêt dans le phénomène. Le fer, le platine, l'acide borique, l'acide phosphorique, la résine,

tels sont les verres qui peuvent être étirés en fils et n'acquièrent une fluidité parfaite qu'à des températures très différentes de celles où ils sont encore à l'état solide.

Deuxième loi de la fusion. Chaleur latente de fusion.—La température d'un corps, qui fond, demeure invariable, quelle que soit la température du foyer de chaleur au milieu duquel il se trouve placé. Si la quantité de chaleur reçue par le corps devient plus grande en un temps donné, la fusion est plus 70 prompte, mais la température ne change pas. C'est précisément cette propriété qui nous a permis de choisir, maintes fois, la glace fondante, pour produire une température constante, pendant un temps quelconque.

Que devient donc la chaleur fournie par le foyer? Elle est employée à effectuer le travail moléculaire, dont le résultat est la désagrégation du corps solide, sa fusion.

On est convenu de donner, à la chaleur qu'absorbe, pour fondre, l'unité de poids d'un corps, le nom de chaleur latente de fusion de ce corps. On apprendra plus tard, dans le chapitre 80 de la Calorimétrie, à mesurer cette quantité de chaleur ; disons, dès à présent, que l'unité de poids de chaque substance exige, pour fondre, une quantité invariable de chaleur, et que le nombre qui la représente est une nouvelle constante spécifique propre à caractériser la substance. Ce nombre varie d'ailleurs beaucoup d'un corps à un autre.

Fusion par l'intermédiaire d'un liquide ou dissolution.—Un solide peut passer à l'état liquide dans des conditions tout autres que celles que nous avons signalées. Le sel ordinaire (chlorure de sodium) et le sucre se dissolvent dans l'eau, l'iode dans 90 l'alcool, le soufre et le phosphore dans le sulfure de carbone. Ce phénomène de dissolution est tout à fait comparable à une fusion ordinaire, puisque la séparation des molécules est produite, dans le solide, sous l'influence du dissolvant, d'une manière au moins aussi complète qu'elle l'eût été par l'intervention de la chaleur.

Les deux lois de la fusion ne se retrouvent pas identiquement dans la dissolution : 1° il n'y a pas de température fixe de dissolution ; 2° il y a une chaleur latente de dissolution, il est

100 vrai, mais elle dépend de la quantité du dissolvant : elle n'est pas constante pour le même corps.

1° La température de la dissolution n'est pas une température fixe pour chaque espèce chimique. Une même substance, le sel marin, le salpêtre, se dissout dans l'eau quelle que soit la température. C'est un fait d'expérience vulgaire. Cependant, la quantité de matière dissoute est loin d'être indépendante de la température : en général, les corps sont notablement plus solubles à chaud qu'à froid. Le salpêtre se dissout en beaucoup plus grande quantité dans l'eau chaude que dans l'eau froide.
110 Ainsi 100 grammes d'eau en dissolvent 32gr, 5 à 20° ; le liquide ne peut pas en dissoudre davantage ; si l'on en ajoute une plus grande quantité, elle reste à l'état solide : on dit que la liqueur est *saturée* ; les 100 grammes d'eau sont saturés par 85 grammes de salpêtre à 50° ; et par 139 grammes à 70°. La variation de la solubilité est rarement aussi grande : aux températures de 20°, 50°, 70° les poids de chlorure de sodium qui saturent 100 grammes d'eau sont 36,3, 37,7, 38,5. Il est des substances, enfin, dont la solubilité, loin d'augmenter avec la température, va en décroissant : plusieurs sels de chaux sont dans ce cas.

120 2° Dans la dissolution, la séparation des molécules est plus complète que dans la fusion, et le corps qui se dissout absorbe d'abord la chaleur latente de fusion, mais en outre il se dissémine dans toutes les parties du liquide, ce qui absorbe encore une certaine quantité de chaleur ; de sorte que, s'il n'y a aucune action chimique concomitante, la chaleur absorbée par un corps qui se dissout est, en réalité, la somme de deux quantités : la chaleur de fusion et la chaleur de diffusion. M. Person a prouvé que plus on étend d'eau une solution, plus elle absorbe de chaleur : il a reconnu que 1 kilogramme d'azotate de potasse qui n'absorbe
130 que 49 calories pour fondre, en exige 69 pour se dissoudre dans 5 grammes d'eau et 80 lorsqu'on le dissout dans un poids d'eau quatre fois plus grand.

Applications,—Mélanges réfrigérants.—Cette absorption de chaleur, au moment de la fusion ou de la dissolution d'un corps solide, a été utilisée pour produire des froids très intenses, à l'aide de certains mélanges qu'on appelle, pour ce motif :

mélanges réfrigérants. Qu'on mette en contact deux corps qui peuvent se combiner ensemble et se dissoudre l'un dans l'autre; s'ils sont tous les deux solides, ni la combinaison ni la dissolution ne seront possibles; ils devront devenir liquides tout 140 d'abord; et, si aucune source étrangère ne leur fournit le calorique de fluidité, ils feront passer leur chaleur sensible à l'état de chaleur latente, se refroidiront eux-mêmes en fondant et refroidiront en même temps les corps voisins. L'abaissement de température, déterminé dans ce cas, sera limité par la congélation du liquide, qui aura été le produit de la dissolution ou de la combinaison des deux corps.

Toutefois, il y a ici une influence qui contre-balance, en partie, l'effet frigorifique dont nous parlons. Comme il n'y a guère de combinaison chimique sans dégagement de chaleur, l'effet obtenu 150 n'est que la résultante de ces deux actions contraires : absorption de chaleur par le fait de la fusion, dégagement de chaleur par le fait de la combinaison. Les substances qu'on mélangera devront donc être choisies de telle façon que cette résultante soit toujours dans le sens d'un abaissement de température.

Les corps les plus fréquemment employés pour former des mélanges réfrigérants sont : la glace pilée et le sel marin qui, mélangés intimement dans la proportion de deux parties de glace pour une de sel marin, produisent un abaissement de température depuis $+15^\circ$ jusqu'à -20°. 160

Avec le chlorure de calcium hydraté et la neige, on peut atteindre une température beaucoup plus basse, celle de la solidification du mercure. Les meilleures proportions à employer sont de 4 parties de sel pour 3 de neige : la quantité de sel peut être augmentée un peu, mais non celle de la neige. Dans ces conditions, la température peut descendre à $-48^\circ,5$ comptés sur le thermomètre à alcool absolu et à -51° comptés sur le thermomètre à air. Seulement, le chlorure de calcium doit se trouver à un état d'hydratation convenable et sous la forme d'une poussière sableuse, afin que le mélange avec la 170 neige puisse être bien intime. M. Person a indiqué un procédé commode pour le préparer : on fait une dissolution concentrée de chlorure de calcium, et on la chauffe jusqu'à ce que la

température d'ébullition soit de 129° ; à ce moment, on laisse refroidir et, avec une spatule de bois, on agite la dissolution, d'une manière continue. Pendant la solidification, le sel se réduit en petits cristaux pulvérulents comme du sable, qu'on doit conserver dans des flacons bouchés à l'émeri.

On peut aussi obtenir des mélanges réfrigérants par l'emploi
180 d'un solide et d'un liquide, l'acide chlorhydrique et le sulfate de soude par exemple; ce sont précisément ces deux corps qui servent à produire la congélation de l'eau dans ces appareils, aujourd'hui assez répandus, qu'on nomme glacières artificielles. Avec 8 parties de sulfate de soude et 5 d'acide chlorhydrique, la température peut abaisser à − 16°. Comme l'emploi journalier des acides peut devenir dangereux, il vaut mieux recourir à un mélange formé de parties égales d'azotate d'ammoniaque et d'eau; ce dernier sel, quoique couteux, n'exige qu'une première mise de fonds; car, en évaporant la dissolution, on régénère
190 indéfiniment l'azotate d'ammoniaque cristallisé. Toutefois l'action frigorifique produite par ce dernier mélange n'amène la congélation de l'eau que lorsque la température de l'air ambiant n'est pas trop élevée. Enfin, on peut aussi se servir, dans le même but, d'un mélange de neige et d'acide sulfurique ; mais ici surtout, on doit tenir compte des proportions employées des deux substances. Tandis que 5 parties de neige et 1 d'acide sulfurique produisent un refroidissement intense, 5 d'acide sulfurique et 1 de neige déterminent une forte élévation de température.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.*

TRANSMISSION DE LA CHALEUR.
DIVERSES ESPÈCES DE CHALEUR.

Transmission des diverses espèces de chaleur.—Les rayons de chaleur de diverses espèces se réfractent inégalement dans le prisme de sel gemme. Cette propriété les distingue les uns des autres, mais ils possèdent encore d'autres propriétés que nous étudierons dans la suite. Pour le moment nous nous con-

tenterons de signaler celles qui se rapportent à la transmission. Melloni a reconnu que chacun de ces rayons traversait très inégalement une même lame d'une substance diathermane. Ils se conduisent comme des sources de chaleur de diverses natures. Ils sont même les éléments des rayonnements émanés des 10 différentes sources: tout flux calorifique est constitué de leur mélange. Entre autres faits intéressants nous citerons leur transmission à travers une couche d'eau: les rayons violets passent en grande proportion; du violet au rouge, la transmission diminue; au delà du rouge, la transmission n'a plus lieu.

En poursuivant ce genre d'étude, M. Tyndall vient de reconnaître que la dissolution d'iode dans le sulfure de carbone, qui est complètement opaque à la chaleur lumineuse, et ne laisse passer la chaleur d'aucun des rayons lumineux contenus depuis le violet jusqu'au rouge, se laisse traverser parfaitement 20 par la chaleur obscure. Ce qui l'a conduit à la découverte d'un des phénomènes les plus capables de surprendre. Une cuve pleine de cette dissolution est-elle placée au devant des rayons solaires que l'on fait converger au foyer d'un miroir parabolique, elle intercepte toute lumière en ce foyer, et cependant la chaleur est très intense: un morceau de bois s'allume au sein de cette chaleur invisible.

Voici un autre fait signalé par Melloni. La chaleur obscure traverse en proportion considérable une lame de sel gemme enfumée, tandis qu'elle est totalement arrêtée par une lame 30 transparente d'alun. Inversement, la chaleur lumineuse traverse abondamment une lame d'alun, tandis qu'elle est arrêtée par la plaque de sel gemme enfumée. La chaleur solaire, composée de rayons obscurs et de rayons lumineux, doit passer et passe en grande quantité à travers une lame de sel gemme enfumée; elle traverse avec la même facilité une lame d'alun; mais un résultat curieux, c'est qu'elle est interceptée par un assemblage formé de ces deux lames. Ce résultat, qui autrefois a beaucoup excité l'attention des physiciens, s'explique facilement, en partant des notions précédentes. L'alun et le sel gemme, pris isolément, 40 laissent passer chacun une espèce de chaleur. Seulement le premier ne se laisse traverser que par la chaleur lumineuse,

l'autre que par la chaleur obscure; le milieu diathermane qu'ils constituent par leur réunion ne peut donc livrer passage ni à l'une ni à l'autre de ces deux espèces de chaleur.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.*

PRINCIPE DE THERMOCHIMIE.

Les phénomènes relatifs au dégagement de chaleur par les actions chimiques forment un nouveau chapitre commun à deux sciences voisines, la physique et la chimie. A travers ces phénomènes, on a pu découvrir des lois parmi lesquelles il en est qui, intimement liées aux principes généraux de la mécanique, intéressent plus particulièrement les physiciens. M. Berthelot, qui s'est occupé, pendant des années, de la question, a bien voulu les exposer à notre demande. C'est à lui que sont dues les pages qui vont suivre.

10 **Causes du développement de chaleur dans les réactions chimiques.**—On admet aujourd'hui qu'au moment de la combinaison chimique, il y a précipitation des molécules les unes sur les autres avec une grande vitesse: de là résulte un dégagement de chaleur, comparable à celui qui a lieu au moment du choc de deux masses sensibles, par exemple d'un marteau sur une enclume. En général, la chaleur dégagée pendant les actions chimiques peut être attribuée aux pertes de force vive, aux transformations de mouvement, enfin aux changements d'arrangement relatif qui ont lieu, au moment où les molécules 20 hétérogènes se précipitent les unes sur les autres pour former des composés nouveaux.

Ceci posé, appliquons aux travaux moléculaires accomplis dans les phénomènes chimiques les relations générales qui existent, d'après les théories mécaniques nouvelles, entre la chaleur disparue et le travail produit, et nous serons conduits à une suite de conséquences qui constituent les théorèmes fondamentaux de la thermochimie.

Premier principe de thermochimie.—La quantité de chaleur dégagée dans une réaction quelconque mesure la somme

des travaux chimiques ou physiques accomplis dans cette 30
réaction.

En effet, elle est précisément égale à la somme des travaux qu'il faudrait accomplir pour séparer les corps après leur réaction et les rétablir dans leur état primitif. Soit, par exemple, le chlore et l'hydrogène : $35^{gr},5$ du premier gaz s'unissent avec 1 gramme du second, pour former l'acide chlorhydrique, en dégageant 22,0 Calories (la Calorie est rapportée comme dans le paragraphe 491 au *kilogramme*) : le composé occupe d'ailleurs le même volume que ses composants. Dans cette circonstance le travail physique est nul et le travail chimique est représenté 40
par $22,0 \times E$, E étant l'équivalent mécanique de la chaleur.

Soit encore l'oxygène ou l'hydrogène : 8 grammes du premier gaz s'unissent avec 1 gramme du second pour former de l'eau. A la température ordinaire, la chaleur dégagée est représentée par 34,5 Calories, c'est-à-dire à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de $34^{\circ},5$ la température de 1 *kilogramme* d'eau. Mais cette quantité n'exprime pas uniquement le travail chimique ; elle représente aussi des travaux physiques. En effet, après la combinaison, les corps ont changé d'état : l'hydrogène et l'oxygène étaient gazeux, l'eau est liquide. La chaleur 50
dégagée comprend donc le travail correspondant à la vaporisation de l'eau. Si l'on défalque la chaleur dégagée par la transformation physique de la vapeur d'eau en liquide, la chaleur développée par la formation de l'eau gazeuse se réduit à $29^{cal},05$ à 0°, sous une pression de 5 millimètres.

Mais cette quantité elle-même varie avec la température, quoique plus faiblement. A 100°, elle devient égale à 29,3 ; à 200°, à 29,4 sous la pression atmosphérique. Ces variations sont dues principalement au travail physique de la pression extérieure, lequel n'est pas le même sur le gaz aqueux que sur 60
l'hydrogène et l'oxygène qui le composent, à cause du changement survenu dans le volume des gaz combinés : on sait, en effet, que 2 volumes d'hydrogène et 1 volume d'oxygène forment seulement 2 volumes de vapeur d'eau.

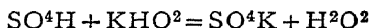
Enfin, si l'on opérait l'union de l'hydrogène et de l'oxygène à 0°, l'eau devenant solide, la chaleur dégagée s'éléverait à $+35,2$;

parce qu'elle serait accrue, en raison du travail physique qui répond à la solidification de l'eau.

Ces détails nous ont paru nécessaires pour bien préciser les 70 causes du dégagement de chaleur produit dans les actions chimiques.

En général, la *chaleur de combinaison atomique*, laquelle exprime le travail réel des forces chimiques, doit être, d'après M. Berthelot, rapportée à la réaction des gaz parfaits opérée à volume constant. C'est-à-dire que les composants et les composés doivent tous être amenés à l'état de gaz parfaits et réagir dans un espace invariable.

A défaut de ces conditions qu'il est rarement possible de réaliser, on peut également rapporter les réactions à l'état solide 80 de tous les corps réagissants, comme on le fait déjà pour les chaleurs spécifiques, d'après la loi de Dulong et Petit. Dans cet état, l'influence de la pression extérieure et celle des changements de température sont devenues peu sensibles: par suite tous les corps sont plus comparables que dans les autres états. Soit, par exemple, la formation du sulfate de potasse, au moyen de l'acide et de la base hydratés

$$SO^4H + KHO^2 = SO^4K + H^2O^2$$

Quatre corps interviennent ici, et l'on peut faire agir chacun d'eux sous trois états: l'état solide, l'état fondu, ou l'état dissous; 90 la chaleur dégagée varie suivant chacune de ces circonstances. Si l'on suppose les quatre corps solides, la chaleur dégagée s'élève à $+40^{cal},6$. S'ils sont tous les quatre dissous dans une grande quantité d'eau, elle est égale à $+15^{cal},7$ seulement. La différence entre ces deux nombres montre combien est grande l'influence exercée par la dissolution et par les états divers des corps réagissants.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.*

CALCUL DU TRAVAIL DES MACHINES A VAPEUR.

Étude plus approfondie de la machine à vapeur.—Mais si on ne s'occupe pas des travaux accessoires qui, perdus pour l'in-

dustriel, sont pour le physicien de même ordre que le travail industriellement utile, et doivent être comptés comme produits par la vapeur, la question est alors celle-ci : Quel est théoriquement le travail effectué par une machine d'une espèce déterminée, ou mieux, quel est le rapport de ce travail à celui qu'elle effectuerait si toute la chaleur fournie à la vapeur était utilisée, rapport que l'on appelle *coefficient économique* de la machine ? Le travail est effectué par une dépense de chaleur, et chaque calorie consommée produit 436 kilogrammètres, il faut donc chercher le nombre de calories qui disparaissent pendant le jeu de la machine. Ce nombre est évidemment la différence entre la quantité de chaleur que la vapeur prend à la chaudière et celle qu'elle restitue au condenseur. Cette différence, divisée par la chaleur totale que la chaudière a fournie, représentera le coefficient cherché. La valeur obtenue n'est relative qu'à la machine employée dans les conditions où elle fonctionne.

Ce rapport a été trouvé dans des cas particuliers : d'une part, on a déduit, des mesures calorimétriques de M. Regnault, la chaleur que la vapeur enlève à la chaudière. D'autre part, M. Hirn a mesuré directement la quantité de chaleur apportée par la vapeur au condenseur, et de ces deux résultats il a déduit $\frac{1}{8}$ pour la valeur moyenne du coefficient économique d'une machine marchant à une pression de 5 atmosphères avec un condenseur à 40°. Ce coefficient $\frac{1}{8}$ surpasse beaucoup celui que d'autres physiciens avaient trouvé. Mais les calculs de M. Macquorn Rankine et de M. Clausius, les expériences de M. Hirn en ont montré la raison : la vapeur utilise par sa détente une quantité de chaleur notable ; non pas seulement parce que sa température s'abaisse, mais surtout parce qu'elle subit une condensation partielle qui s'effectue avec abandon de chaleur latente.

Voici l'expérience de M. Hirn qui montre la condensation produite par la détente : Un cylindre de cuivre fermé à ses deux extrémités par deux plaques de verre bien transparentes quoique épaisses, et muni de deux ajutages à robinet, à été mis

en rapport par l'un d'eux avec la chaudière d'une machine à vapeur ; par l'autre, avec l'atmosphère ; tout d'abord le robinet
40 qui gouverne cet ajutage était à peine ouvert. On mettait le cylindre en communication avec la chaudière et on le remplissait ainsi peu à peu de vapeur saturée et bien sèche, et par conséquent transparente. Ce résultat obtenu, on ouvre le robinet ; la vapeur se précipite dans l'atmosphère et par suite se détend ; en même temps un nuage se forme dans le cylindre, qui bientôt devient d'une opacité complète. Ce résultat ne peut provenir que de la présence, dans le cylindre, d'eau à l'état de nuage formé de gouttelettes liquides. Ainsi la détente est accompagnée de la condensation d'une partie de la vapeur.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.*

LES IDÉES MODERNES SUR LA THERMOMÉTRIE.

I.

Procédé divers—Le thermomètre à mercure est l'instrument idéal dans tout le domaine qui lui convient. Mais, d'une part, ses indications sont nécessairement limitées à la température de congélation du mercure (—39° environ), et à sa température d'ébullition, sous les pressions que l'on peut tolérer dans les thermomètres ; à notre connaissance, on n'a pas encore dépassé utilement 480° avec cet instrument. Enfin la sensibilité du thermomètre à mercure est limitée par les forces capillaires exercées sur le ménisque. Nous ne croyons pas que l'on
10 puisse jamais appliquer cet instrument à la mesure de variations de la température comprises dans les limites du millième de degré.

Le nombre des procédés de mesure proposés pour remplacer le thermomètre à mercure est légion. Comme nous l'avons dit en commençant, on a utilisé les phénomènes thermo-électriques, les résistances électriques, la dilatation des liquides, tels que l'alcool pour les basses températures, l'analyse spectrale des corps incandescents, puis aussi l'écoulement des gaz par des tubes capillaires, la chaleur emmagasinée par un corps et rendue

à un calorimètre, l'échauffement d'un courant d'eau, et beaucoup d'autres ; enfin, comme nous l'avons dit, le thermomètre à gaz est employé quelquefois directement aux mesures. 20

La mesure des températures élevées offre des difficultés particulières à cause des déformations et des modifications moléculaires qu'éprouvent les corps bien avant leur fusion. C'est à la cristallisation des fils de platin, accompagnée de changements permanents et bientôt suivie de rupture, que l'on doit de ne guère pouvoir dépasser, dans la pratique courante, la température de 1200°, dans la mesure par les procédés électriques. En revanche, la méthode calorimétrique fournit de très bons résultats à des températures encore plus élevées. C'est en mesurant la chaleur rendue à un calorimètre par un 30 morceau de métal pris au moment de sa solidification que M. Violle est parvenu à déterminer avec une grande exactitude la température de fusion du platine (1775°), de l'iridium (1950°), et de plusieurs autres métaux réfractaires. Mais cette méthode demande toute une expérimentation, et exige une grande habileté.

Pour les températures inférieures à 1200°, le couple thermométrique Le Chatelier (platine-platine rhodié) en connexion avec un galvanomètre d'Arsonval paraît rendre de très bons services.

La mesure de très petits intervalles de température a été 40 essayée par divers procédés, en particulier par les résistances électriques, et les couples thermo-électriques. En ce moment, les premières sont en honneur. Il semble en effet qu'elles s'adaptent mieux que les autres à ces mesures ; mais ce qui, surtout, leur constitue actuellement une supériorité marquée, c'est l'étude très approfondie qu'en a faite le professeur Langley. Le *bolomètre*, appareil de mesure basé sur la variation de résistance produite dans un fil de métal par la température, est un instrument d'une merveilleuse sensibilité, grâce auquel il a été possible d'aborder des études jugées impraticables il y a quel- 50 ques années, telles par exemple que celles du spectre de la lune, ou des radiations émises par des corps terrestres à des températures basses.

II.

Le désir de donner une idée un peu complète des tendances modernes de la Thermométrie et des conditions expérimentales qui lui sont imposées par les lois mêmes auxquelles obéit la matière, nous a obligé à noyer les grandes lignes du sujet dans une foule de détails d'où il convient de les dégager ; nous allons les résumer en quelques mots.

La thermodynamique donne le moyen de définir une échelle thermométrique indépendante de tout corps réel ou fictif. La dilatation de l'hydrogène nous donne une représentation matérielle très exacte de cette échelle, jusqu'aux températures les plus basses que l'on ait encore établies ; ce phénomène fournit *l'échelle thermométrique normale.*

Le thermomètre à mercure est un instrument délicat et précis, susceptible de donner, entre $-39°$ et $+100°$ et plus, une exactitude réelle de quelques millièmes de degrés. Tous les thermomètres du même verre étudiés *individuellement* coïncident entre eux dans leurs indications corrigées. Une table de correction, *la même pour tous*, ramène leurs indications à l'échelle normale.

Pour la mesure des températures élevées, ou basses, une foule de procédés peuvent être substitués à l'emploi du thermomètre à mercure. Les plus généralement applicables sont les procédés électriques. Ces derniers sont les seuls qui permettent de mesurer avec une certaine précision relative des variations de la température inférieures au millième de degré.

Depuis dix ans la thermométrie s'est entièrement transformée ; un grand domaine est bien fixé, et conquis pour longtemps. Les regards se tournent vers de nouvelles questions dont l'étude est en bonne voie. Les tendances sont nettement caractérisées ; mais telles ont été dans le passé les surprises en bien ou en mal, qu'il serait téméraire de dire ce qui restera de tout ce grand travail.

CH.-ED. GUILLAUME,
Docteur ès sciences.

Revue Générale des Sciences.

PRINCIPE DE L'ÉQUIVALENCE.

Expériences de M. Hirn sur le choc.—Nous rappellerons les expériences de M. Hirn sur l'écrasement du plomb.

Un gros cylindre de fonte soutenu par des cordes verticales peut se mouvoir parallèlement à lui-même dans un plan vertical. Dans le même plan vertical est suspendue, de la même manière, une enclume de grès dont la tête est recouverte d'une plaque épaisse de fer forgé. Entre ces deux pièces on place le morceau de plomb qui doit être soumis à l'écrasement et dont on détermine à l'avance le poids et la chaleur spécifique. Connaissant le poids du bélier et la hauteur à laquelle on le soulève, connaissant aussi le poids de l'enclume et la hauteur à laquelle elle s'élève après le choc, on en conclut aisément l'expression de la quantité de travail qui a été transformée en chaleur. Le plomb s'est échauffé par le choc ; on mesure son échauffement en le laissant tomber dans un calorimètre. On a ainsi les données nécessaires pour calculer E.

Cette méthode est curieuse, mais sujette à quelques critiques. Une portion de la chaleur produite est retenue par le bélier pendant son contact avec le plomb et échappe ainsi à la mesure. De plus le cycle n'est pas fermé ; le plomb soumis à l'expérience subit une déformation et s'écrouit un peu. Les corrections qu'il faudrait introduire sont probablement faibles, mais ne peuvent être calculées. Les résultats obtenus par M. Hirn sont néanmoins remarquables ; le nombre obtenu pour E est très voisin de 425.

Nécessité de ne mesurer E qu'avec des cycles fermés.—Les deux cas que nous venons d'étudier nous montrent qu'il est essentiel de ne déterminer E qu'avec des cycles fermés. L'équation $\mathfrak{T}=EQ$ n'est vérifiée que dans ce cas.—Nous allons encore en citer quelques exemples.

Considérons un corps qui se contracte quand on l'échauffe, par exemple l'eau entre 0° et 4°. Un tel corps se refroidit lorsqu'on le comprime. On a donc une dépense de travail accompagnée de la production de froid. L'équation $\mathfrak{T}=EQ$ n'est pas vérifiée, car le cycle n'est pas fermé. Si on veut fermer le cycle, il faut permettre au corps de se décomprimer. Sup-

posons qu'on opère sur un liquide contenu dans un corps de pompe. La compression sera obtenue en chargeant le piston de poids; en descendant, le piston comprimera le liquide en exécutant un travail. Pour fermer le cycle, il faudra laisser le
40 liquide se décomprimer sans pour cela permettre aux poids de remonter; sans quoi on ne ferait que revenir sur ses pas, en produisant dans la seconde partie de l'expérience un travail égal et contraire à celui qui intervient dans la première. On pourra ramener le liquide à son volume primitif en ouvrant dans le corps de pompe un robinet R en communication avec un espace V de grandeur convenable. Si alors $-q$ désigne la chaleur dégagée pendant la compression, $+q'$ la chaleur dégagée pendant la décompression, on a:

$$\frac{\mathfrak{T}}{-q+q'}=425.$$

50 **Calcul de E à l'aide des constantes des gaz.**—La considération des gaz va nous permettre de trouver E sans nouvelles expériences, en profitant simplement des données numériques fournies par un certain nombre d'expériences connues. C'est la méthode de Mayer.

Imaginons que l'unité de masse d'air enfermée dans un corps de pompe sous la pression p_0 occupe, à la température de 1° C., un volume v_0+v_0a, a étant le coefficient de dilatation de l'air. Laissons la pression p_0 constante et abaissons la température de 1° C., la diminution de volume est v_0a; on voit facilement que le travail accompli par le piston est p_0v_0a. En même temps la
60 masse d'air perd de la chaleur, et si C est la chaleur spécifique de l'air à pression constante, la quantité de chaleur perdue est C.

L'air occupe actuellement le volume v_0, sous la pression p_0, et à la température zéro. Ramenons-le à la température initiale en maintenant son volume constant. La force élastique change, mais, le piston restant fixe, le travail dépensé est nul. Toutefois il faut fournir au gaz sa chaleur spécifique à volume constant c. Pour fermer le cycle, ramenons le gaz à sa pression et à son volume primitifs; il suffira de lui rendre le volume v_0+v_0a, car, en vertu de la loi de Mariotte, il reprendra de lui-même la
70 pression p_0. Il est inutile, pour effectuer cette transformation, de dépenser à nouveau du travail; il faut donc se garder de faire

remonter le piston. Pour résoudre le problème, nous supposerons que le volume v_0 est mis en communication avec l'espace vide $v_0\alpha$ par un conduit de volume négligeable. En ouvrant le robinet R, le gaz se détend sans produire de travail, mais en dégageant une quantité de chaleur x (Joule et Thomson).

La quantité totale de chaleur *dégagée* est donc

$$Q = C - c + x,$$

et par suite

$$E = \frac{\mathfrak{T}}{Q} = \frac{p_0 v_0 \alpha}{C - c + \alpha}.$$

Ici la difficulté est de connaître x ; l'expérience seule peut le donner. Les expériences de Joule et Thomson, sur lesquelles nous reviendrons plus tard, ont montré que x est très petit et qu'on peut le négliger ; l'erreur qui en résulte n'est pour l'air que de $\frac{1}{500}$ environ, pour l'hydrogène de $\frac{1}{1200}$ de la valeur à calculer. On peut d'autant mieux admettre cette approximation que l'incertitude est beaucoup plus grande sur les valeurs de C et de c. On prendra donc comme valeur approchée

$$E = \frac{p_0 v_0 \alpha}{C - c};$$

v_0 est le volume occupé à zéro par l'unité de masse d'air ou d'un gaz quelconque sous une pression arbitraire p_0. Regnault a mesuré directement C pour un grand nombre de gaz ; c se déduit de la valeur de $\frac{C}{c}$, rapport déterminé, soit par la méthode de Clément et Desormes, soit par la mesure de la vitesse du son.

Les valeurs obtenues pour E, par cette méthode, avec les différents gaz, sont voisines de 425. En voici le tableau :

Air, ...	426
Oxygène, ...	425,7
Azote, ...	431,3
Hydrogène, ...	425,3

Il est remarquable que la valeur de E, trouvée au moyen de l'hydrogène, soit presque identique au résultat des meilleures expériences de M. Joule. On peut rapprocher ce fait de cet autre que x a la plus faible valeur pour l'hydrogène.

LIPPMANN, *Cours de Thermodynamique.*

E.—OPTIQUE.

Anneaux colorés. Théories de la lumière.—Diffraction.— Qui n'a admiré la variété des couleurs réfléchies par les bulles qui s'élèvent à la surface de l'eau de savon? Sénèque y faisait sans doute allusion en citant ces vers des *Métamorphoses* d'Ovide (liv. VI, v. 65 et suiv.):

> Sed nunc diversi niteant quum mille colores,
> Transitus ipse tamen spectantia lumina fallit;
> Usque adeo quod tangit idem est, tamen ultima distant.

C'est ce genre de phénomènes que Hooke étudia, avant Newton, 10 dans son *Traité de Micrographie*, publié en 1664. Les anneaux colorés qui entourent certaines taches blanches des lamelles de mica fixèrent d'abord son attention: à partir du milieu de ces taches les couleurs y étaient rangées dans l'ordre suivant: le bleu, le pourpre, l'écarlate, le jaune et le vert; la même série de teintes se répétait neuf ou dix fois. En pressant, avec le pouce et l'index, deux lames de verre l'une contre l'autre, Hooke produisait les mêmes séries d'anneaux colorés que dans le mica; l'interposition d'une mince couche d'air entre les deux lames faisait changer les couleurs. Les mêmes changements 20 se produisaient en substituant à l'air divers fluides: ils étaient d'autant plus vifs que le pouvoir réfringent de ces fluides différait davantage de celui des lames de verre. Quand la couche de fluide interposée était beaucoup plus épaisse au milieu que vers les bords, de manière à figurer une lentille convexe, les couleurs se manifestaient dans l'ordre suivant: rouge, jaune, vert, bleu, etc. Lorsque la couche interposée était, au contraire, beaucoup plus mince au milieu qu'aux bords, de manière à figurer une lentille concave, l'ordre des couleurs était renversé. Ces phénomènes cessaient dès que les lames de verre ou les 30 couches de fluides interposées avaient une certaine épaisseur. Hooke observa encore, observation facile à répéter, qu'en clivant avec une aiguille une lame de mica, on arrive à une

lamelle d'une couleur uniforme; que chacune des lamelles d'une épaisseur inférieure à celle-ci présente une couleur différente; que la superposition de plusieurs de ces lamelles donne les teintes les plus inattendues; que, par exemple, une lamelle jaune ajoutée à une lamelle bleue donne du pourpre foncé. Enfin il constata que les mêmes phénomènes de coloration se manifestent: 1° dans des globes de matières translucides, tels que verre, résine, colophane, térébenthine, solutions de gomme, 40 eau de savon, etc.; 2° sur l'acier graduellement trempé, sur le laiton, le cuivre, l'or, l'argent, l'étain et principalement sur le plomb; 3° sur des substances organiques, telle que coquilles, perles, tendons etc.; 4° par l'action de toute matière glutineuse, étendue à la surface d'un verre ou d'un métal poli.

L'étude de ces phénomènes conduisit Hooke à imaginer la théorie des *ondulations de la lumière*. D'après cette théorie, dont le fond est emprunté à Descartes, la lumière est produite par de petits mouvements vibratoires, « d'un milieu subtil, homogène (éther), mouvements transmis dans tous les sens 50 comme les rayons partant du centre d'une sphère.» L'auteur suppose ensuite que les phénomènes de réflexion et de réfraction ont lieu aux confins des milieux matériels transparents, dans lesquels « la substance ondulatoire, l'éther,» aurait des densités différentes. Appliquant cette théorie à la production des couleurs dans des lames minces, il admet que la réflexion des deux faces opposées (supérieure et inférieure) est la principale cause de ces couleurs. « Supposez, dit-il, qu'un faisceau lumineux tombe obliquement sur une lame mince: une partie se réfléchira sur la première face, et comme la lame est trans- 60 parente, une autre partie sera réfractée; celle-ci se réfléchira à la seconde surface pour être de nouveau réfractée à la première surface, de telle sorte qu'après deux réfractions et une réflexion, le faisceau lumineux s'affaiblit et son impulsion vient se placer en arrière de celle qu'avait déterminée le rayon qui s'était d'abord réfléchi, et comme les deux surfaces de la lame sont tellement rapprochées que l'œil n'y distingue aucune séparation, la confusion de ces deux impulsions, dont la plus forte précède la plus faible, produit sur la rétine la sensation de la couleur

70 jaune. Si les deux surfaces sont écartées davantage l'une de l'autre, l'impulsion la plus faible sera tellement distancée qu'elle pourra coïncider avec la seconde, la troisième, la quatrième, la cinquième, etc., à mesure que la lame devient plus épaisse; c'est ainsi que se produiront le jaune, le rouge, le pourpre, le bleu, le vert.»

Cette ingénieuse théorie contient en germe la doctrine des interférences. En 1675, Newton étudia, à son tour, le phénomène de coloration des lames, mais sans citer d'abord le travail de son rival, ce qui amena, entre ces deux hommes de génie, une
80 vive polémique qui devait finir par la reconnaissance de leurs droits réciproques. Newton commença ses expériences par des plaques ou lames épaisses. Ayant réuni étroitement deux prismes, dont l'un avait par hasard sa face un peu convexe, et se plaçant très obliquement à la surface de contact pour mieux observer la lumière réfléchie, il aperçut que l'endroit où les prismes se touchaient formait une tache noire, parce qu'il n'y avait que peu ou point de lumière réfléchie: le point de contact formait une espèce de trou par où il était facile de distinguer les objets placés au-delà; en pressant les prismes l'un contre
90 l'autre, cette tache augmentait considérablement. En tournant les prismes autour de leur axe commun, quelques rayons de lumière commençaient à être réfléchis et à passer à travers le verre; il voyait en même temps se produire des arcs déliés de différentes couleurs, qui paraissaient d'abord en forme conchoïde. En continuant la rotation des prismes pour diminuer l'inclinaison des rayons, il voyait ces arcs grandir et se courber autour de la tache au point de former des cercles ou anneaux. Les couleurs qui apparaissaient les premières étaient violettes et bleues; puis venaient le rouge et le jaune. Les cercles colorés
100 étaient alors rangés, depuis la tache noire centrale, dans l'ordre suivant: le blanc, le bleu, le violet, le noir, le rouge, l'orangé, le jaune. Le jaune et le rouge étaient beaucoup moins intenses que le bleu et le violet. Le mouvement des prismes étant continué, les anneaux colorés se rétrécissaient en approchant du blanc, jusqu'à ce qu'il n'y eût plus que des anneaux noirs et blancs. Quand, arrivé à ce point, le mouvement des prismes

était continué, les couleurs ressortaient de nouveau et se manifestaient dans un ordre inverse.

Newton mesurait le diamètre des anneaux successifs, en même temps qu'il variait l'épaisseur des lames. Il trouva que 110 dans les lames dont l'épaisseur augmente suivant la progression des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, etc., si les premières ou les plus minces réfléchissent un rayon de lumière homogène, la seconde le transmettra, la troisième le réfléchira de nouveau, et ainsi de suite; en sorte que les lames des rangs impairs, 1, 3, 5, 7, etc., réfléchiront les mêmes rayons que ceux de leurs correspondantes en nombres pairs, 2, 4, 6, 8, etc., laisseront passer. Une couleur homogène donnée par une lame est dite du premier ordre, si la lame réfléchit tous les rayons de cette couleur; dans une lame 3 fois plus épaisse, la couleur 120 est de 2ᵉ ordre; dans une autre 5 fois plus épaisse, la couleur est de 3ᵉ ordre, etc. La vivacité des couleurs diminue avec leur ordre à partir de la couleur du premier ordre, qui est la plus vive de toutes.

Ces observations portèrent Newton à imaginer une théorie particulière, différente de celle de Hooke. Suivant cette théorie, chaque particule de lumière, depuis l'instant où elle émane d'un corps rayonnant, éprouve périodiquement, et à des intervalles égaux, une continuelle alternative de disposition à se réfléchir ou à se transmettre à travers les surfaces des milieux 130 transparents qu'elle rencontre; de façon que si, par exemple, une telle surface se présente à la particule lumineuse pendant une des alternatives où la tendance à la réflexion a lieu, cette tendance, que Newton appelle *accès de facile réflexion*, la fera céder plus aisément au pouvoir réflecteur de la surface, tandis qu'elle cède plus difficilement à ce pouvoir lorsqu'elle se trouve dans la phase contraire, que Newton nomme *accès de facile transmission*.

Les théories de Hooke et de Newton, le système des ondes et le système de l'émission, divisèrent depuis lors les physiciens. 140 « On ne trouvera pas, dit Biot, dans l'histoire des sciences physiques, un exemple plus hardi de la hauteur d'abstraction où la discussion des expériences peut conduire. Car, bien que,

dans le système newtonien, les *accès*, en tant qu'ils sont une propriété physique, ne puissent s'appliquer qu'à des particules matérielles, et supposent ainsi tacitement que la lumière est de la matière, ce dont on peut douter, mais ce que Newton n'a jamais mis en doute, néanmoins leurs caractères sont si rigidement définis et moulés sur les lois expérimentales avec tant
150 d'exactitude, qu'ils subsisteraient encore sans aucun changement si l'on venait à découvrir que la lumière fût constituée d'une autre manière, par exemple qu'elle consistât dans des ondulations propagées.»—Biot, évidemment favorable à la théorie newtonienne, rappelle ici que Fresnel attribuait aux ondulations de chaque rayon lumineux simple une longueur exactement quadruple de celle que Newton avait donnée, d'après l'expérience, aux intervalles des accès de ce même rayon lumineux. C'est ce que ne fit pas Young, qui attribuait aux longueurs d'ondulations des valeurs toutes différentes, établies d'après
160 une hypothèse préconçue. Aussi ses nombres ne satisfont-ils point au détail des phénomènes, tandis que ceux de Fresnel, moulés sur les longueurs des accès newtoniens, y satisfont admirablement.

Voici comment sont appréciés le travail et le système de Newton par un physicien qui a fait lui-même d'importantes découvertes en optique. «Le travail sur les lames minces (dans le 2e livre du *Traité d'Optique* de Newton) est, dit Arago, généralement considéré comme un modèle dans l'art de faire des expériences et dans celui de les interpréter. Cette apprécia-
170 tion est bien méritée. Cependant le chapitre en question peut donner lieu à des critiques fondées. On est fâché, par exemple, au point de vue historique, de voir que Newton ne cite pas Hooke comme ayant le premier fait naître des anneaux entre deux lentilles superposées. Il eût été également désirable que l'illustre auteur remarquât que la théorie donnée par Hooke de la formation des anneaux colorés conduisait nécessairement aux lois expérimentales obtenues par lui sur la succession des épaisseurs de la lame d'air qui engendre les mêmes couleurs . . . . Quant à la fameuse théorie des accès de facile réflexion et de
180 facile transmission, elle ne m'a jamais paru que la traduction

de phénomènes en langue vulgaire ; elle n'explique rien dans le vrai sens de ce mot. Mais voici, en point de fait, ce qui est plus grave. Newton prétend que les couleurs d'une lame mince ne dépendent pas de la nature des milieux entre lesquels elle est renfermée. Des expériences ultérieures ont prouvé que les couleurs de cette lame dépendent si manifestement des réfringences particulières des milieux entre lesquels elle se trouve contenue, que, noire dans un certain cas, la lame devient blanche dans un autre, sans avoir nullement changé d'épaisseur ; que le rouge y remplace le vert dans les mêmes circonstances, 190 et ainsi de suite. Quant à l'application que Newton a faite de ses belles expériences à l'explication des couleurs naturelles des corps, on a démontré depuis longtemps qu'elle est de tous points inadmissible.»

Newton a consacré le troisième et dernier livre de son *Optique* aux phénomènes que présente la lumière quand elle rase les bords d'obstacles interposés dans son trajet. Ces phénomènes avaient été, comme nous l'avons montré, décrits pour la première fois par Grimaldi, sous le nom de *diffraction*, qui leur est resté. Newton nie qu'il se forme des franges colorées dans l'intérieur 200 de l'ombre des corps. Cependant cette formation a été observée non-seulement par Grimaldi, Maraldi et Delisle, mais par des physiciens plus récents, par Fresnel, Thomas Young et Arago. Quant aux franges extérieures, elles sont décrites et mesurées par lui avec le plus grand soin. Mais lorsque, pour expliquer leur formation, Newton va jusqu'à supposer que les rayons qui passent près des corps éprouvent un mouvement d'anguille, il ne remarque pas, comme l'a fait observer Arago, que cette supposition elle-même ne rendrait nullement compte de la position des franges à diverses distances du corps opaque, 210 telles qu'elles résultent de ses propres expériences.

Les Newtoniens ont attribué les effets de diffraction à deux actions, l'une attractive, l'autre répulsive, que les bords exerceraient sur les particules lumineuses : l'attraction serait exercée depuis le contact jusqu'à une certaine distance, où commencerait la répulsion, qui s'étendrait jusqu'à une autre distance. Biot et Pouillet essayèrent d'expliquer la diffraction par l'action ré-

pulsive seule. Un fait remarquable, qui fut observé, en 1803, par Th. Young, c'est que si l'on approche un écran opaque de l'un 220 des bords du corps rasé par la lumière, on fait aussitôt disparaître la totalité des franges qui se forment dans l'intérieur de l'ombre. Arago, en répétant l'expérience d'Young, trouva que l'on peut faire également disparaître la totalité des franges intérieures en substituant un verre diaphane à faces parallèles à l'écran opaque. Fresnel remarqua que les franges lumineuses ne se projetaient pas en ligne droite, comme l'avait dit Biot, mais qu'elles étaient concaves vers les bords de l'ombre du corps opaque. En mesurant l'intervalle du bord de l'ombre géométrique au point le plus sombre d'une même frange et à différentes distances du 230 corps opaque, il trouva les ordonnées d'une hyperbole dont les distances seraient les abscisses.

La disposition des franges de l'intérieur de l'ombre par l'interposition de l'écran conduisit Fresnel à cette réflexion: « Puisque, en interceptant la lumière d'un côté du fil, on fait, dit-il, disparaître les franges intérieures, le concours des rayons qui arrivent des deux côtés est nécessaire à leur production. Ces franges ne peuvent pas provenir du simple mélange des rayons, puisque chaque côté du fil ne jette dans l'ombre qu'une lumière blanche continue; c'est donc la rencontre, le croisement même 240 de ces rayons qui produit les franges. Cette conséquence, qui n'est pour ainsi dire que la traduction du phénomène, me semble tout à fait opposée à l'hypothèse de l'émission, et confirme le système qui fait consister la lumière dans les vibrations d'un fluide particulier.

L'étude, si difficile, de la diffraction, sur laquelle on est loin d'avoir dit le dernier mot, est très importante, entre autres dans l'usage du micromètre pour les observations astronomiques.

HOEFER, *Histoire de la Physique.*

POLARISATION.

Polarisation chromatique ou colorée.—C'est à Arago que l'on doit la découverte de la polarisation colorée. Il l'exposa dans un mémoire lu le 11 août 1811 à l'Académie des sciences.

Laissons-le raconter lui-même dans quelles circonstances il fit cette importante découverte : « En examinant, par un temps serein, une lame assez mince de mica, à l'aide d'un prisme de spath d'Islande, je vis que les deux images qui se projetaient sur l'atmosphère n'étaient pas teintes des mêmes couleurs : l'une d'elles était jaune verdâtre, la seconde rouge pourpre, tandis que la partie où les deux images se confondaient était de la couleur naturelle du mica vu à l'œil nu. Je reconnus en même temps qu'un léger changement dans l'inclinaison de la lame par rapport aux rayons qui la traversent, faisait varier la couleur des deux images, et que si, en laissant cette inclinaison constante et le prisme dans la même position, on se contentait de faire tourner la lame de mica dans son propre plan, on trouvait quatre positions à angle droit où les deux images prismatiques sont du même éclat et parfaitement blanches. En laissant la lame immobile et faisant tourner le prisme, on voyait de même chaque image acquérir successivement diverses couleurs et passer par le blanc après chaque quart de révolution. Au reste, pour toutes ces positions du prisme et de la lame, quelle que fût la couleur d'un des faisceaux, le second présentait toujours la couleur complémentaire,—j'appelle *couleurs complémentaires* celles qui, réunies, forment du blanc,—en sorte que, dans ces points, où les deux images n'étaient pas séparées par la double réfraction du cristal, le mélange de ces deux couleurs formait du blanc. Il est bon, cependant, de remarquer que cette dernière condition n'est rigoureusement satisfaite que lorsque la lame est partout de même épaisseur. C'est alors seulement, en effet, que chaque image est d'une teinte uniforme dans toute son étendue ; car, dans les autres cas, elles présentent l'une et l'autre dans des points, mêmes contigus, des couleurs très différentes et disposées d'autant plus irrégulièrement que le mica qu'on emploie a des inégalités plus sensibles. Quoi qu'il en soit, les parties des images qui se correspondent sont toujours teintes de couleurs complémentaires.»

Pour écarter toute idée de l'influence qu'aurait pu avoir, sur l'apparition des couleurs, la dispersion de la lumière dans les images prismatiques, Arago employait tantôt un rhomboïde de

spath calcaire, tantôt un prisme de cette substance, auquel il avait adossé un prisme de verre ordinaire, afin de le rendre achromatique; les résultats furent toujours les mêmes. Il se demanda ensuite si ses expériences n'étaient pas analogues à celles que Newton expose dans le 2e livre de son *Optique*: deux lentilles de verre ordinaire ayant été superposées l'une sur l'autre (24e expérience du 2e livre), l'illustre auteur ne voyait que cinq ou six anneaux colorés à l'œil nu, tandis qu'à l'aide d'un prisme il lui arrivait souvent d'en compter plus de quarante.
50 Mais Arago ne tarda pas à reconnaître qu'il n'y a ici aucune identité de phénomènes. Les anneaux colorés de Newton existaient déjà dans la lame d'air comprise entre les deux verres, seulement ils y étaient trop enserrés pour qu'on pût les distinguer tous à l'œil nu: le prisme employé n'avait donc pour effet que de séparer les orbites des divers anneaux, en déviant inégalement les rayons différemment colorés. Rien de pareil n'a lieu dans l'expérience mémorable d'Arago. Si les couleurs n'eussent été invisibles dans le mica, à l'œil nu, qu'à cause de leur mélange, on ne les aurait pas aperçues davantage en
60 examinant le mica au travers des faces parallèles d'un rhomboïde de carbonate de chaux ou avec un prisme achromatisé; car, dans ces deux circonstances, les rayons de diverses couleurs ayant été également réfractés, les teintes auraient été aussi mélangées dans les deux images de rhomboïde que dans la plaque de mica elle-même, vue à l'œil nu.

Après avoir sommairement rappelé les travaux faits par Bartholin, Huyghens et Malus sur la double réfraction, Arago résume en ces termes son beau mémoire sur la polarisation colorée: « On peut donc encore donner aux rayons de lumière
70 une telle modification, qu'ils ne ressemblent plus ni à la lumière directe ni aux rayons polarisés ordinaires: ces nouveaux rayons se distingueront, d'abord de la lumière polarisée en ce qu'ils fournissent constamment deux images en traversant un rhomboïde, et puis de la lumière ordinaire, par la propriété qu'ils ont de donner toujours deux faisceaux complémentaires, mais dont les couleurs varient avec la position de la section principale du cristal à travers lequel on les fait passer. Un rayon de

lumière directe, en tombant sur un corps diaphane, abandonne à la réflexion partielle une partie de ses molécules. Un rayon polarisé est transmis en totalité, abstraction faite de l'absorption, 80 lorsque le corps diaphane est situé d'une certaine manière par rapport aux côtés des rayons. Les diverses molécules colorées dont se compose un rayon blanc, lorsqu'il a éprouvé la modification particulière dont il s'agit ici, ne se réflechissent que successivement et les unes après les autres, dans l'ordre de leurs couleurs, pendant que le corps diaphane tourne autour du rayon en faisant toujours le même angle avec lui. Par conséquent, si l'on fait tourner un miroir de verre autour d'un faisceau de lumière directe, et si l'on n'altère pas leur inclinaison naturelle, la quantité de rayons transmis ou celle de rayons 90 réfléchis sera la même dans toutes les positions; mais si le faisceau est déjà polarisé, et si, de plus, l'angle d'incidence est de 35°, on trouvera deux positions diamétralement opposées, dans lesquelles le miroir ne réfléchira pas une seule molécule de lumière. Si nous supposons enfin que, toutes les autres circonstances restant les mêmes, le miroir soit éclairé par un faisceau de lumière blanche déjà modifiée par une plaque de cristal de roche, il sera successivement teint, à chaque demi-révolution, de toute la série des couleurs prismatiques, tant par réflexion que par réfraction, avec cette particularité qu'au 100 même instant ces deux classes de couleurs sont toujours complémentaires.

Arago a recommandé la *lunette de Rochon* comme un instrument très propre à expérimenter la polarisation chromatique. Cet instrument se compose tout simplement d'une lunette ordinaire dans l'intérieur de laquelle est placé un prisme de cristal de roche ou de carbonate de chaux. Ce prisme est achromatique et mobile le long de l'axe, ce qui donne le moyen de séparer plus ou moins complètement les deux images de l'objet auquel on vise. En disposant l'axe optique de la 110 lunette de manière à faire un angle de 35° environ avec la surface d'un miroir non étamé, on voit chaque image disparaître deux fois pendant une révolution complète de l'instrument. La lunette étant dans l'une de ces positions où l'on ne voit qu'une

seule image, si l'on interpose une plaque de mica, on en verra aussitôt deux dont les couleurs complémentaires dépendront de l'inclinaison de la lame interposée et de son épaisseur.

Brewster publia en 1813 dans son *Treatise on new philosophical instruments*, des observations analogues à celles qu'Arago avait 120 faites en 1811.

HOEFER, *Histoire de la Physique.*

ACTIONS DIVERSES PRODUITES PAR LE SPECTRE SOLAIRE.

Les radiations qui, par leur ensemble, constituent le spectre solaire, produisent trois genres d'effets, qu'il importe de signaler : ce sont les *effets lumineux*, les *effets calorifiques* et les *effets chimiques*.

Intensité lumineuse des diverses parties du spectre solaire.—Lorsque l'on examine avec quelque attention un spectre solaire, on reconnaît de suite que les différentes couleurs n'ont pas le même pouvoir éclairant. Une page imprimée en caractères fins, par exemple, est beaucoup plus facile à lire dans la 10 chambre noire quand on projette sur elle la lumière jaune du spectre, que lorsqu'on l'éclaire par l'emploi de tout autre rayon lumineux. Mais si l'on a pu constater qu'il y avait une différence entre les pouvoirs éclairants des différentes régions du spectre, on n'a pas jusqu'ici déterminé d'une manière satisfaisante les rapports de leurs intensités lumineuses. Frauenhofer, dans diverses expériences faites à ce sujet, a trouvé des résultats assez peu concordants ; cependant il paraît certain que, c'est entre les raies D et E que se trouve le maximum de clarté.

Effets calorifiques.—Lorsqu'un thermomètre sensible stationne 20 successivement dans les différentes parties du spectre, on trouve que ses indications sont très variables d'un point à l'autre, et, chose remarquable ! ce n'est pas dans les parties les plus lumineuses que la température s'élève le plus. Jusqu'à Melloni, les physiciens n'avaient pas été d'accord sur le mode de distribution de la chaleur dans le spectre solaire, ces divergences d'opinion tenaient à la différence de nature des prismes employés pour réaliser l'expérience. Melloni a fait voir que le sel gemme

était la seule substance qui donnât des résultats comparables. Il a démontré, le premier, que les autres milieux réfringents absorbaient très inégalement les rayons calorifiques de diverses espèces, et que là était la cause du désaccord. Le sel gemme seul laisse passer *à peu près* également bien les rayons calorifiques qui tombent sur lui, quelle que soit leur nature : il peut donc servir à reconnaître, plus exactement que toute autre substance, en quelle proportion la chaleur se trouve accumulée dans chacune des couleurs dont l'ensemble constitue le spectre solaire. Il résulte des expériences de Melloni que la température du thermomètre s'élève de plus en plus à mesure qu'on s'écarte du violet pour se diriger vers le rouge. En continuant le déplacement du thermomètre au delà du rouge, en le faisant arriver dans la partie obscure du spectre, la température croît jusqu'à une petite distance ; puis un peu plus loin, elle commence à baisser, pour décroître de plus en plus à mesure qu'on s'éloigne davantage de la région lumineuse. Toutefois, il y a encore une élévation de température sensible alors même que l'instrument se trouve distant du rouge d'une longueur égale à la longueur du spectre visible.

Ce résultat très remarquable prouve qu'au delà des limites du spectre, dans des parties de l'écran atteintes par des rayons que l'œil ne perçoit pas, il existe encore des radiations qui émanent du soleil et dont le thermomètre paraît jusqu'à présent seul apte à accuser l'existence.

Effets chimiques.—La lumière provoque, selon les cas, des modifications diverses dans la nature chimique des corps que l'on met en présence. Le chlore sec et l'hydrogène sec, qui restent mélangés, sans unir, dans une obscurité profonde, se combinent sous l'influence des rayons lumineux. Les sels haloïdes d'argent subissent, au contraire, une décomposition sous la même influence. Cette dernière action de la lumière, qui est utilisée dans le daguerréotype et dans la photographie, se manifeste avec une intensité variable selon l'espèce des rayons qui tombent sur la substance sensible. La décomposition de l'iodure d'argent est surtout prononcée dans la partie violette du spectre ; elle est nulle dans le jaune, l'orangé et le rouge.

Niepce de Saint-Victor, qui fit faire de si grands progrès à l'art de la photographie, réussit à fixer sur la plaque daguerrienne les couleurs mêmes du spectre solaire, en recourant à l'action chimique des rayons lumineux. Malheureusement, la lumière détruit assez promptement l'effet qu'elle a déterminé une
70 première fois, et les couleurs s'effacent peu à peu. Après deux ou trois jours d'exposition à la lumière solaire, elles ont disparu complètement. Il y a eu cependant un progrès réel accompli au point de vue de la stabilité des teintes, progrès qui est dû à Niepce. Dans les premiers essais de ce genre tentés par M. E. Becquerel, les teintes obtenues étaient beaucoup plus fugaces, et l'exposition à la lumière, pendant quelques heures seulement, suffisait pour les faire disparaître. Pour réaliser ce genre d'expérience, M. Becquerel chlorurait une lame d'argent à sa surface en l'employant, comme pôle positif d'une pile, dans
80 l'auge où l'on décomposait l'acide chlorhydrique; la plaque étant sortie du bain, le spectre reçu sur elle ne tardait pas à se montrer persistant avec ses couleurs naturelles. Niepce employa peu après un procédé de beaucoup préférable : il détermina la chloruration par le contact d'un hypochlorite alcalin dans lequel il immergea la plaque, il recouvrit ensuite celle-ci d'un vernis au chlorure de plomb, la fit recuire et l'exposa à l'action des faisceaux de lumière colorée. Les couleurs apparurent comme dans l'expérience de M. Becquerel; mais elles persistèrent beaucoup plus longtemps.

90 **Spectre ultra-violet.**—Un autre phénomène bien digne d'attion mérite d'être signalé : au delà du violet, dans la partie obscure, *il s'opère une décomposition des sels d'argent*: le chlorure et l'iodure noircissent ; et sur les parties attaquées, des raies apparaissent, dont la disposition est analogue à celle qui est offerte par les raies du spectre lumineux; elles ressortent, en blanc, sur le fond noir du sel d'argent décomposé, indiquant ainsi des solutions de continuité dans la réfrangibilité des rayons actifs. Au delà du violet, existent donc des radiations particulières que l'œil n'est pas capable de saisir, auxquelles le thermo-
100 mètre est insensible, mais dont l'activité chimique est puissante. Nous arrivons ainsi à cette conséquence nécessaire, que le

spectre complet formé par les radiations solaires se prolonge au delà du violet et au delà du rouge, et c'est seulement la partie moyenne du spectre total que nos yeux peuvent distinguer.

On démontre l'existence de ces raies qui n'impressionnent pas la rétine en projetant sur une substance altérable le spectre produit par la lumière solaire. Le spectre ainsi obtenu n'est pas très étendu, parce que les lentilles et les prismes de verre absorbent les rayons ultra-violets avec une grande énergie; d'autre part, les raies ne sont pas très nombreuses, parce que la fente 110 doit rester assez large, si on veut que le faisceau de lumière solaire étalé sur un écran conserve une activité chimique appréciable. On arrive à produire des images plus étendues, en substituant, aux appareils de verre, des lentilles et des prismes en quartz, comme l'a indiqué M. Stokes.

Expériences de M. Mascart.—Le résultat est surtout excellent quand on place une petite plaque sensible au foyer de la lunette d'un spectroscope à lentilles de quartz. L'image qui se produit en ce point est très petite, mais très intense, ce qui permet de diminuer la largeur de la fente, c'est-à-dire d'épurer le spectre, 120 autant qu'on le fait pour les rayons lumineux: cette petite image, reproduite par les procédés photographiques ordinaires, peut ensuite être étudiée à la loupe ou au microscope. Telle est la méthode que M. Mascart a employée dans ces dernières années; il a montré que le spectre solaire ultra-violet est plus large que le spectre lumineux lui-même et qu'il renferme un nombre considérable de raies inactives susceptibles d'être étudiées avec la même précision que les raies obscures de la région lumineuse.

Les vapeurs métalliques incandescentes donnent surtout des 130 raies chimiquement inactives, plus réfrangibles que le violet; on le constate aisément en plaçant un sel volatil quelconque dans la flamme d'une lampe de Bunsen, ou même dans le dard d'un chalumeau à gaz d'éclairage alimenté par un courant d'oxygène: les raies que l'on obtient ainsi sur des plaques sensibles sont encore caractéristiques pour chaque métal. L'expérience réussit mieux si on volatilise le métal lui-même à l'aide d'étincelles électriques, et les spectres acquièrent alors

une largeur tout à fait inattendue. En faisant passer une série
140 d'étincelles entre deux fils d'argent à l'aide d'une puissante bobine, M. Mascart a pu reproduire un spectre ultra-violet très pur, six fois plus long que le spectre lumineux. Il y a lieu de s'étonner que la lumière solaire donne un spectre si petit par rapport à celui que produisent les vapeurs incandescentes ; il est très probable que les rayons très réfrangibles qui émanent du soleil sont absorbés par notre atmosphère terrestre. Ne voyons-nous pas, en effet, le verre absorber une grande partie des rayons ultra-violets, que l'emploi de milieux différents nous permet d'apercevoir dans le spectre solaire tel que nous pouvons
150 l'obtenir à la surface de la terre?

Phosphorescence.—Pour achever l'étude des effets de la lumière, il nous reste à signaler la propriété que présentent certains corps qui, après avoir été exposés quelque temps au soleil, apparaissent ensuite brillants dans l'obscurité, comme de véritables sources lumineuses. Cette propriété rappelle des phénomènes connus de tout le monde, alors qu'il s'agit de la chaleur. Un corps qui a été exposé au rayonnement d'un corps chaud constitue, au bout de peu de temps, une source de chaleur De même un corps, exposé à l'action d'un corps
160 lumineux, devient lumineux lui-même après que la source excitatrice a disparu. Le phosphore de Canton, que l'on obtient en calcinant des écailles d'huîtres, est de tous les corps phosphorescents le plus anciennement connu. Après avoir subi l'insolation pendant quelque temps, il répand dans l'obscurité une lueur qui persiste pendant plusieurs minutes. La substance ne perd pas ses propriétés par les insolations successives auxquelles on la soumet. On peut renouveler ce genre d'essais sur le même corps aussi souvent que l'on veut, la réussite est toujours certaine.

170 M. E. Becquerel a étendu considérablement le nombre des corps phosphorescents connus, et cela, en employant un appareil assez simple nommé *phosphoroscope*, qui permet d'apercevoir un corps, quelques millièmes de seconde après son exposition au soleil, ou à une lumière artificielle, c'est-à-dire au moment où le phénomène de la phosphorescence est le plus intense. En

outre, l'appareil reproduit les mêmes effets à des intervalles de temps assez rapprochés pour que les impressions qui se succèdent persistent sur la rétine comme si elles étaient continues. Par ce procédé, la plupart des corps se montrent phosphorescents. Il en est bien peu qui résistent à un pareil mode 180 d'investigation.

Les phénomènes de phosphorescence présentent, dans leurs manifestations, des circonstances variées que M. E. Becquerel a étudiées. Il a recherché l'espèce des rayons qui déterminent la phosphorescence, l'espèce de ceux qui sont émis par le corps devenu lumineux, et enfin la durée appréciable pendant laquelle la lueur est perceptible.

Il a reconnu que les diverses espèces de rayons solaires n'étaient pas également aptes à communiquer aux corps la faculté d'être phosphorescents. Les rayons qui la communi- 190 quent le mieux sont en général les rayons les plus réfrangibles : les rayons situés dans la partie obscure du spectre, au delà du violet, sont particulièrement aptes à engendrer la phosphorescence. Quant aux rayons émis par un corps phosphorescent, ils sont moins réfrangibles que ceux qui lui ont servi à rendre manifeste cette propriété de répandre une lueur dans l'obscurité.

BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours de Physique.*

1874.

CHRONOPHOTOGRAPHIE.

DISPOSITIONS DIVERSES DE L'APPAREIL, SUIVANT LA NATURE DU SUJET QU'ON ÉTUDIE.

On vient de voir la disposition de l'appareil pour la chronophotographie sur bande mobile ; il reste à indiquer la manière d'appliquer cette méthode suivant la nature du sujet qu'on étudie.

A. **Disposition à donner aux images sur la bande pelliculaire.** —Quand le chronophotographe fonctionne dans sa position normale, c'est-à-dire repose sur son chariot, il donne des images

qui se suivent en série horizontale de gauche à droite. La figure 17 montre 12 de ces images, dans lesquelles on peut suivre les 10 phases du mouvement d'une vague qui vient frapper des rochers : la vague monte d'abord et couvre ces rochers d'écume, puis se retire et l'agitation de la mer se calme peu à peu.

Pour étudier les phénomènes de ce genre, la meilleure manière de rendre le mouvement sensible, c'est de le reproduire synthétiquement au moyen du *zootrope*.

Tout le monde connaît la belle invention de Plateau qui, plaçant à la circonférence d'un disque de carton une série d'images représentant les phases successives d'un mouvement, reproduisait, pour l'œil, l'apparence de ce mouvement, en faisant 20 tourner le disque en face d'un miroir dans lequel on regardait les images à travers de petites fentes percées à la circonférence du carton. Plateau donna le nom de *Phénakisticope* à cet instrument, qui resta longtemps à l'état de jouet scientifique. Depuis quelques années, on a donné au phénakisticope des dispositions nouvelles qui en rendent l'emploi plus commode : celle qui est connue sous le nom de *zootrope* se prête fort bien à l'étude des mouvements obtenus sur bandes pelliculaires. La bande de papier sensible qui a reçu les images positives se place à l'intérieur d'un cylindre creux et porte à sa circonférence les 30 fentes par lesquelles l'œil voit se succéder les images pendant que le cylindre tourne sur son axe.

On sait qu'il suffit d'une dizaine d'images successives par seconde pour que l'œil éprouve la sensation d'un mouvement continu. Or, comme la chronophotographie peut donner à chaque seconde 40 à 60 images, en faisant tourner une telle bande dans le zootrope, à raison de 10 images par seconde, on obtient la sensation du mouvement ralenti de quatre à six fois, et par conséquent, bien plus facile à suivre dans toutes ses phases. Cette méthode nous a servi, il y a quelques années, 40 pour l'analyse des mouvements du vol des Oiseaux.

Pour l'analyse délicate d'un mouvement cette méthode n'est cependant pas suffisante ; elle comporte encore les incertitudes inséparables des sensations subjectives ; elle est donc très inférieure à la chronophotographie sur plaque fixe qui livre

directement l'épure géométrique du mouvement étudié. Or, il est possible de ramener la seconde forme de chronophotographie à la première, c'est-a-dire de reporter sur une même surface les images obtenues sur des surfaces différentes. On y arrive, dans certains cas, par la superposition de clichés transparents, d'autres fois par une série de décalques successifs, ou même par 50 une série d'opérations du genre de celles que F. Galton a nommées *photographies composites*.

Dans un grand nombre de cas, il suffit, pour rendre les phases du mouvement parfaitement intelligibles, de disposer les images en série verticale. C'est ce qui a été fait, pour les mouvements du cheval au pas.

Lues de bas en haut, c'est-à-dire dans leur ordre de succession naturel, ces figures montrent d'abord que le cheval s'avance graduellement vers la droite de la figure, et permet tent, d'après l'échelle métrique, d'apprécier la valeur de 60 ce déplacement pendant chaque dixième de seconde. Elles montrent aussi, pour chaque membre, les phases de son changement d'attitude, soit dans la période d'appui, soit dans celle de lever.

Pour obtenir sur la bande pelliculaire cette disposition des images en série verticale, il suffit de coucher l'appareil sur le côté; le déroulement de la bande pelliculaire et son passage d'une bobine sur l'autre se font alors dans le sens vertical.

B. **Fréquence des images.**—Suivant la vitesse du mouvement qu'on veut analyser, on doit faire varier la fréquence des images; 70 il en faut en général une dizaine au moins pendant la durée d'un acte complet pour en faire saisir les phases. Ainsi, pour analyser le coup d'aile d'un oiseau, si cet acte dure $\frac{1}{5}$ de seconde, les éclairements et par conséquent les images doivent se suivre à raison de 40 par seconde. Le pas d'un homme, qui est bien plus lent, n'exige qu'une dizaine d'images par seconde. Pour d'autres actes plus lentes encore, il faut mettre un plus grand intervalle. Ainsi, une astérie placée à la renverse au fond d'un aquarium met environ 10 minutes à se retourner; pour suivre les phases du mouvement, il suffit de prendre une image toutes 80 les minutes. Enfin, l'épanouissement d'une fleur, s'il met 10

heures à se produire, permet de laisser 24 minutes d'intervalle entre deux images successives.

La manivelle placée à l'arrière de l'appareil imprime au rouage moteur un mouvement très rapide; il serait difficile de la tourner assez lentement pour réduire la fréquence des images au-dessous d'une par seconde; aussi procède-t-on autrement quand on doit mettre un long intervalle entre les éclairements successifs.

90 L'axe des disques obturateurs se prolonge en avant de l'appareil sous forme d'un carré sur lequel s'adapte la manivelle. Celle-ci, à chacun de ses tours, ne produit plus alors qu'un seul tour du disque; il est donc très facile de réduire à volonté la fréquence des images, en faisant faire à la manivelle un tour toutes les secondes, toutes les minutes ou toutes les heures.

Dans les cas où les images doivent être prises à de très longs intervalles, au lieu de tourner la manivelle à la main, il vaut mieux confier ce rôle à un rouage auxiliaire qui s'en acquitte 100 parfaitement.

C. **Durée des éclairements.**—La durée des éclairements présente un rapport naturel avec la fréquence des images; cela résulte de la construction même de l'obturateur. En effet, si le grand disque a un mètre de circonférence, et les fenêtres éclairantes 1 centimètre de diamètre, la coïncidence des fenêtres produira l'éclairement pendant $\frac{1}{200}$ environ du tour de disque. Or, à mesure que le disque tournera plus rapidement, cette durée absolue de l'éclairement deviendra plus courte: avec un tour de disque par seconde on aura une image avec pose de $\frac{1}{200}$ de 110 seconde; avec deux tours, deux images avec pose de $\frac{1}{400}$ de seconde; avec dix tours, dix images avec pose de $\frac{1}{2000}$ de seconde.

Cette relation naturelle entre la fréquence des images et la durée du temps de pose est en général avantageuse; mais il est parfois utile de changer ce rapport, dans l'intérêt même des épreuves photographiques; sans cela elles pourraient avoir des temps de pose trop longs ou insuffisants; on y arrive en modifiant la largeur des fenêtres.

D. Choix des objectifs suivant la nature du sujet qu'on étudie.—Dans tout appareil photographique, on doit changer 120 d'objectif suivant les dimensions et la distance du sujet dont on prend l'image. Cette nécessité est plus grande encore avec le chronophotographe, car cet instrument s'applique aux études les plus diverses. Tous les objectifs dont on se sert doivent être montés sur une boîte analogue à celle qui est représentée et qui permet de les couper à leur partie moyenne pour laisser passer les disques obturateurs au centre même de l'objectif.

Toutefois, une disposition spéciale doit être employée quand la chronophotographie s'applique à l'étude des mouvements dans le champ du microscope. Nous en parlerons ultérieurement à 130 propos des applications spéciales de la méthode.

Dans toutes les circonstances, et quel que soit l'objectif employé, la chronophotographie peut être pratiquée sous ses deux formes, c'est-à-dire sur plaque fixe devant un champ obscur et sur pellicule mobile s'il s'agit d'objets se détachant sur un fond lumineux.

E. J. MAREY, *Revue Générale des Sciences.*

PHOTOMÉTRIE.

Définitions.—Les grandeurs que nous avons étudiées jusqu'ici ont une existence objective, et sont des fonctions de l'espace, du temps et de la matière ou de l'énergie; en photométrie, un élément subjectif s'ajoute aux précédents pour déterminer la valeur des quantités que l'on veut exprimer. L'énergie dans le spectre a une existence réelle, et peut être représentée par une fonction d'une certaine variable, la longueur d'onde λ ou une de ses fonctions; mais, en photométrie, cette énergie est appréciée au moyen d'une unité qui est elle-même une fonction assez mal définie de λ, la sensibilité d'un œil normal. En adoptant pour 10 cette dernière une forme déterminée, on peut calculer *a priori* la valeur photométrique d'une radiation, c'est-à-dire son intensité optique. Mais, au lieu de procéder par synthèse, on préfère déterminer directement, par l'expérience, cette intensité en com-

parant la lumière à étudier à une lumière prise comme étalon. L'étalon, qui définit l'unité, dépend ici de propriétés très complexes de la matière.

En photométrie, on considère essentiellement trois éléments mesurables : l'*éclat*, l'*intensité lumineuse* et l'*éclairement* ; aucune
20 de ces quantités ne possède d'unité absolue, et toutes trois doivent être définies en valeur relative.

L'intensité lumineuse est l'intégrale superficielle de l'éclat, ce dernier étant la propriété d'un élément de surface d'émettre plus ou moins de lumière. L'éclairement est la quantité de lumière à une certaine distance de la source. L'unité d'éclat est l'éclat moyen d'une source émettant l'unité d'intensité par unité de surface ; l'unité d'éclairement est l'éclairement à l'unité de distance de la source unité. L'éclairement pourrait aussi se définir par l'éclat d'une surface parfaitement blanche à l'endroit considéré ;
30 nous donnons alors la valeur 1, sans dimensions au pouvoir diffusant de la surface en question : le pouvoir diffusant doit, en effet, être défini comme rapport de deux quantités de même espèce.

Désignons par [E] la dimension de l'éclat ; l'intensité lumineuse sera

$$[I] = EL^2$$

L'intensité d'éclairement variant suivant le rapport inverse du carré de la distance sera exprimée en dimensions par $[IL^{-2}]$; l'éclairement est donc effectivement homogène à l'éclat.

40 **Unités et étalons photométriques.**—La plupart des étalons photométriques sont fournis par la flamme d'une lampe brûlant dans des conditions déterminées. L'éclat varie d'un point à l'autre de la flamme, et l'intensité n'est pas la même dans toutes les directions ; les flammes symétriques, autour d'un axe vertical, sont définies comme étalons dans le sens horizontal ; les flammes plates sont prises dans leur plus grande largeur. Dans l'étude des foyers lumineux, on a soin de mesurer l'intensité dans un grand nombre de directions de l'espace ; on distingue alors l'intensité locale de l'*intensité moyenne* ou *sphérique*. L'in-
50 tensité horizontale était la seule que l'on considérât autre-

fois ; aujourd'hui, les diverses directions prennent plus ou moins d'importance suivant le but à remplir par un éclairage donné.

Le premier étalon photométrique est la *bougie*, employée primitivement par Bouguer ; tandis qu'en France Dumas et Regnault lui substituaient la lampe Carcel brûlant par heure 42 grammes d'huile de colza épurée, la bougie restait, à l'étranger, l'unité d'intensité lumineuse. M. Giroud et M. Methven ont cherché, l'un en France, l'autre en Angleterre, à construire des lampes étalons brûlant le gaz d'éclairage ordinaire. M. Vernon Harcourt, au contraire, prépare un gaz spécial, en carburant de l'air par du pentane ; enfin, M. Hefner-Alteneck a proposé comme étalon une lampe à acétate d'amyle à mèche libre. Tous les étalons à combustion présentent quelques irrégularités inévitables. D'autre part, les foyers électriques sont encore trop mal connus pour pouvoir être pris en considération. C'est pour ramener à une même unité précise les mesures rapportées aux diverses unités en usage, que la Conférence internationale des électriciens, réunie à Paris en 1884, a adopté l'étalon proposé par M. J. Violle, et défini l'unité de lumière comme *la quantité de lumière émise normalement par un centimètre carré de platine au moment de sa solidification.*

La surface du platine possède donc, dans ces conditions, l'unité d'éclat.

Le congrès des électriciens de 1889 a complété la décision précédente, en définissant la bougie décimale, vingtième de l'unité Violle.

On a adopté, en principe, comme unité d'éclairement, l'éclairement produit à un mètre de distance par l'unité Violle ; le nom de *lux* a été proposé pour cette unité ; dans la pratique, on lui substitue fréquemment l'unité correspondant à la bougie décimale.

L'éclat et l'éclairement se déduisent de l'intensité lumineuse et de l'unité de surface ; il suffira de donner ici le rapport des étalons d'intensité ; les nombres du tableau suivant ont été déterminés par M. Violle.

TABLEAU COMPARATIF DES ÉTALONS D'INTENSITÉ LUMINEUSE

			Bougie			
	Étalon Violle	Lampe Carcel	fran-çaise	alle-mande	an-glaise	Lampe Hefner
Étalon Violle .	1	2,08	16,1	16,4	18,5	18,9
Lampe Cancel .	0,481	1	7,75	7,89	8,91	9,08
Bougie française	0,062	0,130	1	1,02	1,15	1,17
„ allemande	0,061	0,127	0,98	1	1,13	1,15
„ anglaise .	0,054	0,112	0,87	0,89	1	1,02
Lampe Hefner .	0,053	0,110	0,85	0,87	0,98	1

F.—ÉLECTRICITÉ.

Si un pôle auxiliaire CC ($P = 00^{mm},001$) protégé sur toute sa surface, sauf en un point, par une épaisse couche de verre, est placé dans le centre du courant moléculaire, en face du pôle négatif A, et si la totalité des parois intérieures et extérieures du tube est recouverte de métal en communication avec la terre, de façon à éliminer l'électricité positive aussi rapidement que possible, on observe que les molécules partant du pôle négatif qui viennent rencontrer le pôle auxiliaire, transportent, dans leur déplacement à travers le tube, une charge négative, et communiquent de l'électricité négative au pôle auxiliaire.

L'effet produit dans ce tube est intéressant, car c'est le premier qui me permit de comprendre pourquoi, dans mes expériences antérieures, j'avais toujours obtenu une charge positive sur un pôle auxiliaire placé dans le courant qui venait directement du pôle négatif. Arrivé à ce point, il était facile d'imaginer une forme d'appareil qui pût vérifier complètement la théorie, et jeter, en même temps, une vive lumière sur ce sujet. Les figures représentent un tel tube, et sur ces figures, j'ai essayé d'indiquer

l'état électrique, à une extrême raréfaction, au moyen d'un certain nombre de signes + et —.

Le vide a été poussé à $00^{mm}0001$, et l'on voit que, dans le voisinage du pôle positif, et presque jusqu'au pôle négatif, le tube est fortement chargé d'électricité positive, les molécules négatives s'élançant du pôle négatif, sous forme d'un cône qui disparaît rapidement. Si un pôle auxiliaire est placé dans la position indiquée par la figure, l'afflux des molécules, positives ou négatives, est à peu près le même, et aucun courant ne se produit, à travers le galvanomètre, vers la terre. Ceci constitue le point *neutre*. Mais si nous imaginons que le pôle auxiliaire est placé comme dans la figure, les molécules électrisées positivement sont en nombre beaucoup plus considérables que les molécules négatives, et l'on obtient de l'électricité positive. Enfin, si le pôle auxiliaire est placé comme dans la figure, ce sont les molécules négatives qui dominent, et le pôle fournira de l'électricité négative.

A mesure que la raréfaction augmente, la charge positive du tube augmente, et le point neutre se rapproche du pôle négatif, et l'on peut obtenir un degré de non-conductibilité, où l'électricité positive domine tellement qu'il est impossible de recueillir de l'électricité négative sur le pôle auxiliaire à moins de l'amener au contact du pôle négatif. C'est ce qui arrive dans le tube qui est devant vous, et je vais maintenant vous montrer le changement de direction qui se produit dans le courant, lorsqu'on déplace le pôle auxiliaire.

Je n'ai pu réussir, en produisant le courant « d'Edison » dans les lampes à incandescence, à obtenir ce changement de direction, même aux raréfactions les plus élevées que je puisse atteindre avec ma pompe. Le sujet demande de nouvelles recherches, et, comme les autres phénomènes résiduels, ces désaccords permettent une riche moisson de découvertes futures aux expérimentateurs, de même que les produits résiduels de la chimie ont souvent été une source de corps nouveaux et intéressants.

SIR W. CROOKES,
de la Société royale de Londres.

Revue Générale des Sciences.

Théorie Électromagnétique de la Lumière.

L'étude que nous venons de faire nous a montré qu'il peut exister des ondes électromagnétiques qui, comme celles de la lumière, sont constituées par des perturbations transversales par rapport à la direction de propagation et voyagent d'un mouvement uniforme. Maxwell a émis l'opinion qu'il y a, non seulement analogie, mais identité entre les deux ordres de phénomènes; selon lui, la vibration lumineuse consiste en perturbations périodiques du champ électromagnétique: c'est la *théorie électromagnétique de la lumière.*

10 « Dans cette théorie, dit Maxwell, V doit être la vitesse de la lumière, quantité mesurable directement. D'autre part, le même V doit représenter le rapport des unités électromagnétique et électrostatique. Voilà deux genres d'expériences absolument dissemblables qui doivent donner la même valeur de V. Il y a là un critérium de la valeur physique de la théorie électromagnétique de la lumière. »

Voici quelques-uns des nombres trouvés par différents expérimentateurs pour le rapport des unités:

Weber et Kohlrausch . . .	$3{,}1074 \times 10^{10}$ centim.
20 Maxwell	$2{,}8800 \times 10^{10}$
W. Thomson	$2{,}8250 \times 10^{10}$
J. Thomson	$2{,}9630 \times 10^{10}$
Klemenčič	$3{,}0160 \times 10^{10}$
Himdmstedt	$3{,}0074 \times 10^{10}$
E.-B. Rosa	$3{,}0004 \times 10^{10}$

D'autre part, M. Cornu a trouvé pour la vitesse de la lumière $3{,}004 \times 10^{10}$ centimètres par seconde. Ce nombre diffère à peine des derniers nombres du tableau précédent, lesquels sont vraisemblablement les plus exacts. La vérification expérimentale 30 est donc complète.

Nous avons vu qu'il existe aussi une relation entre l'indice de réfraction des ondes électromagnétiques et la constante diélectrique. Cette relation ne se vérifie pas exactement, sauf pour les gaz. Il devait en être ainsi. En premier lieu, l'indice n et la

constante diélectrique K, qui d'après la loi devraient satisfaire à l'équation $K = n^2$, se rapportent à des vibrations de même période; or les mesures de constantes diélectriques ne peuvent s'exécuter que par des opérations relativement lentes, et par suite l'indice n correspond à de très grandes longueurs d'onde. Comme on ne connaît pas l'équation exacte qui relie les indices 40 aux longueurs d'ondes, on n'a aucun moyen de déterminer avec quelque précision la valeur de n dont on aurait besoin. En second lieu, la mesure des constantes diélectriques des solides et des liquides présente de grandes difficultés : c'est une nouvelle source d'erreurs. Les gaz au contraire échappent aux deux espèces de difficultés qui viennent d'être signalées : d'une part leur dispersion est extrêmement faible et par suite n est presqu' indépendant de la longueur d'onde; d'autre part leurs constantes diélectriques se mesurent facilement.

Le tableau suivant contient les valeurs de $\sqrt{K}$ et de n pour 50 un certain nombre de gaz; les valeurs de K sont empruntées à M. Bolzmann.

	$\sqrt{K}$	n
Air	1,000295	1,000294
Acide carbonique . . .	1,000473	1,000449
Hydrogène	1,000132	1,000138
Oxyde de carbone . . .	1,000345	1,000340
Protoxyde d'azote . . .	1,000492	1,000503
Bicarbure d'hydrogène . .	1,000656	1,000678
Protocarbure d'hydrogène .	1,000472	1,000443

L'accord est très satisfaisant. 60

Comme le dit Maxwell, « nos théories de la structure des corps devront être perfectionnées de beaucoup avant que l'on puisse déduire les propriétés optiques d'une substance de ses autres propriétés physiques; en tout cas, dès maintenant on peut affirmer que si $\sqrt{K}$ n'est pas l'expression complète de l'indice de réfraction, c'en est néanmoins le terme le plus important. »

R. BLONDLOT,
Professeur adjoint de Physique à la Faculté des Sciences de Nancy.

Revue Générale des Sciences.

L'Induction Magnétique et les Phénomènes Moléculaires.

Certaines hypothèses sur les phénomènes moléculaires et la structure intime des corps permettent de concevoir la façon dont se produit l'induction magnétique et d'expliquer l'existence de l'aimantation résiduelle. Je me propose d'exposer les expériences que j'ai faites à ce sujet.

Quand un morceau de fer, de nickel ou de cobalt est aimanté par induction, l'état magnétique pénètre le morceau entier; ce n'est pas seulement un changement superficiel. Brisez ce morceau en autant de fragments que vous voudrez: vous verrez
10 que chacun de ces fragments est un aimant. En cherchant une théorie magnétique, il faut pénétrer dans l'organisation même de la matière, recourir aux molécules.

A priori deux hypothèses paraissent admissibles. On peut supposer, avec Poisson, que chaque molécule s'aimante quand elle est dans un champ magnétique. On peut aussi admettre la théorie de Weber, d'après laquelle chaque molécule de fer est un aimant dont l'induction ne fait que changer l'orientation. Dans cette théorie, un morceau de fer, vierge de toute aimantation, ne présenterait aucun pôle,—bien que ses molécules soient elles-
20 mêmes des aimants,—parce qu'elles sont pêle-mêle quant à la direction et ne se trouvent pas plus orientées d'un côté que d'un autre. Mais aussitôt qu'on les soumet à l'action inductrice du champ, elles changent d'orientation et viennent se placer dans la direction du courant; tout se passe comme si chaque particule élémentaire présentait un pôle magnétique.

Tous les faits confirment l'hypothèse de Weber. Il en est un que je dois indiquer tout de suite, car il se présente comme la conséquence de sa théorie: cette théorie exige que, lorsque les aimants moléculaires se trouvent tous tournés dans la même
30 direction, le morceau ait reçu toute l'aimantation dont il est capable. Si donc l'hypothèse de Weber est conforme à la réalité, il faut nous attendre à trouver une limite à l'aimantation produite dans un morceau de fer ou de tout autre métal susceptible de s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique, si puissante

que puisse être cette influence. Or, c'est là le fait qu'on observe. Le phénomène de la saturation a été établi il y a nombre d'années déjà à la suite d'expériences qui fixèrent la limite de l'intensité d'aimantation.

Lorsqu'un morceau de fer est placé dans un champ magnétique, il ne devient saturé que si le champ est extrêmement fort. 40 Un champ faible ne produit que très peu d'aimantation; à mesure qu'on augmente sa puissance, l'aimantation augmente jusqu'à une certaine limite. Cela montre que les molécules ne s'alignent que lentement sous l'influence inductrice. La résistance des molécules est vaincue à mesure que croît la puissance du champ. Quelle est la force qui empêche les molécules de se rendre immédiatement à l'influence *orientante* du champ, et d'où vient cette force? Enfin, comment se fait-il que les molécules, après avoir été déplacées, ne retournent que partiellement à leur place, et non pas d'un coup 50 toutes ensemble aussitôt que l'action du champ vient à cesser?

Je crois qu'on peut résoudre ces questions d'une façon satisfaisante et complète en tenant compte des actions que les molécules exercent nécessairement les unes sur les autres par cela même qu'elles sont des aimants. Nous allons étudier cette question en examinant la façon dont se comportent des groupes de petits aimants montés sur des pivots comme des aiguilles de boussoles, libres par conséquent de tourner, mais influencés chacun par la présence de ses voisins.

J. A. EWING,
F.R.S.

Revue Générale des Sciences.

LES MOTEURS À COURANTS ALTERNATIFS.

Depuis quelques années, les courants alternatifs ont pris un développement industriel considérable, et les stations centrales organisées pour la distribution de l'énergie électrique par courants alternatifs sont presque aussi nombreuses et aussi puissantes que les usines distribuant l'énergie électrique sous forme de courant continu.

Les courants alternatifs présentent cependant de graves inconvénients : les trois principaux sont l'impossibilité de les emmagasiner : l'impossibilité de les appliquer directement aux in-
10 dustries électrochimiques dans lesquelles intervient l'électrolyse ; et enfin leur inaptitude à produire du travail mécanique aussi commodément et aussi économiquement que les courants continus.

Mais ces inconvénients sont rachetés par un grand nombre d'avantages plus importants encore qui justifient l'emploi des courants alternatifs. Les dynamos à courants alternatifs, ou *alternateurs*, sont des machines d'une très grande simplicité, se prêtant plus facilement que les dynamos à courant continu à la construction d'unités de grande puissance et à la génération de forces électromotrices efficaces beaucoup plus élevées. En fait
20 les forces électromotrices alternatives employées industriellement varient entre 50 et 10,000 volts, tandis que les dynamos à courant continu actuelles atteignent difficilement 3000 volts. L'isolement des courants alternatifs est beaucoup plus facile que celui des courants continus de même tension, et il semble établi que, à force électromotrice égale, les substances isolantes couvrant des câbles à courants alternatifs se conservent mieux que les isolants couvrant des câbles à courant continu.

Enfin, dernier avantage, et non des moindres, le courant alternatif se prête merveilleusement à toutes les transformations
30 exigées pour son application, les transformateurs à courants alternatifs étant des appareils inertes agissant sous l'influence de phénomènes purement physiques, sans qu'aucune partie mobile intervienne dans leur fonctionnement. Grâce à cette précieuse propriété des transformateurs, il est possible de produire une puissance électrique donnée à bas potentiel et à grande intensité, de la transformer à haut potentiel et faible intensité, de la transporter à une distance considérable, sur une ligne aérienne de section relativement faible, de la retransformer à l'arrivée et de lui donner les propriétés exigées par les applications,
40 c'est-à-dire un faible potentiel et une grande intensité. Toutes ces transformations s'effectuent avec des rendements auxquels les appareils mécaniques ne nous avaient pas habitués ; malgré la double transformation et une certaine

perte en ligne, perte que les tensions élevées ont pour but de rendre minima, on peut retrouver à l'arrivée entre 70 et 80 pour 100 de l'énergie électrique produite au départ par l'alternateur à basse tension.

Les facilités de production des tensions élevées, de transmission à grande distance sans pertes importantes, et de transformation à l'arrivée sont donc, en résumé, des propriétés re- 50
marquables qui justifient le développement inattendu pris par les distributions d'énergie électrique à courants alternatifs pendant ces dernières années. Ce développement eût été encore plus grand si l'on était parvenu à faire disparaître les inconvénients que nous signalions au début de cette étude. Bien que les tentatives faites pour emmagasiner l'énergie électrique fournie par les courants alternatifs en les redressant et pour les rendre propres aux opérations électrochimiques n'aient amené jusqu'à présent aucun résultat industriel appréciable, il n'en est pas de même en ce qui concerne la transformation de l'énergie 60
électrique des courants alternatifs en travail mécanique : le moteur électrique à courants alternatifs est aujourd'hui un organe industriel d'un rendement satisfaisant, d'un maniement facile, et dont les applications commencent à se répandre, aussi bien pour la production des petites forces motrices que pour celle des grandes forces motrices et leur transmission à grande distance. Les expériences actuellement en préparation entre Lauffen et Francfort-sur-le-Mein, où l'on projette de transmettre une puissance de 300 chevaux à 175 kilomètres de distance, à l'aide de courants alternatifs à phases multiples (variété spéciale 70
des courants alternatifs), avec des tensions qui varieront entre 20,000 et 30,000 volts efficaces, nous dirons bientôt dans quelle mesure sont fondées les espérances de transport à grande distance de puissantes forces motrices basées sur l'emploi de ces courants ; mais, quel que soit le résultat de ces expériences, il n'en restera pas moins acquis, par ce que nous savons déjà, que les moteurs à courants alternatifs peuvent déjà rivaliser, dans bon nombre de circonstances, avec les moteurs à courant continu. Il n'est donc pas sans intérêt de passer en revue les solutions acquises et les résultats déjà obtenus. 80

Rappelons d'abord quelques définitions et quelques propriétés générales essentielles. Le type du courant alternatif parfait est celui produit par un circuit régulier et indéformable, un cercle tournant autour d'un de ses diamètres, par exemple, dans un champ magnétique uniforme, avec une vitesse angulaire uniforme, l'axe de rotation étant perpendiculaire à la direction des lignes de force du champ. Ce circuit est le siège d'une force électromotrice sinusoïdale changeant deux fois de signe par tour. L'intervalle de temps qui sépare deux passages successifs de la 90 force électromotrice par zéro est le *temps périodique* ou la *période* de la machine; on la désigne par la lettre T. Son inverse $\frac{1}{T}$ est la *fréquence* et s'exprime comme l'inverse d'un temps ou le nombre de périodes par seconde. Les fréquences des courants alternatifs actuellement employés dans l'industrie varient entre 42 périodes par seconde et 133 périodes par seconde. Des recherches récentes semblent indiquer que l'on aurait grand intérêt à augmenter beaucoup les fréquences actuelles; mais l'étude de cette question sortirait du cadre que nous nous sommes tracé.

100 Les propriétés des courants alternatifs sont, au point de vue de la propagation, très différentes de celles des courants continus.

Supposons, par exemple, qu'un générateur à courants alternatifs ou un *alternateur*, pour employer une expression abrégée qui commence à se répandre, soit établi en un circuit avec un fil de cuivre replié en double. L'intensité du courant prendra une certaine valeur. Mais il suffit de rouler ce fil sous forme d'une bobine, et de placer à l'intérieur de cette bobine un faisceau formé de fils de fer pour que l'intensité se réduise dans des 110 proportions considérables. C'est que, dans le second cas, on a considérablement augmenté le coefficient de self-induction du circuit, coefficient qui était nul ou négligeable dans le premier cas, et, par suite, sa *résistance apparente.* Non seulement l'intensité s'est affaiblie, mais il s'est produit un retard de phase ou *décalage* entre l'intensité et la force électromotrice, et le produit de l'intensité efficace par la force électromotrice efficace ne

représente plus la puissance moyenne produite par l'alternateur. Cette puissance moyenne n'est qu'une fraction de ce produit, fraction que l'on peut rendre aussi petite que l'on veut en augmentant suffisamment le décalage, c'est-à-dire en augmentant 120 suffisamment le coefficient de self-induction.

Des actions plus complexes se manifestent si l'on intercale un condensateur dans le circuit, ou si les phénomènes de self-induction sont accompagnés de phénomènes d'induction mutuelle. Il se produit alors des phénomènes d'apparence paradoxale que la théorie permet d'ailleurs de prévoir et d'expliquer. C'est ainsi, par exemple, qu'un condensateur monté en tension avec une bobine de self-induction, la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur fournissant le courant qui les traverse, est plus petite que celle existant aux bornes de chacun des appareils 130 pris individuellement. Si un condensateur est monté en dérivation avec une bobine présentant de la self-induction, l'intensité totale traversant les deux dérivations est plus grande que celle fournie par l'alternateur, etc.

Nous avons cité ces quelques exemples pour montrer combien les questions de propagation du courant se compliquent dès que l'on a affaire à des courants alternatifs. Aussi n'est-il pas étonnant que les études de ces courants et les progrès de leurs applications soient à peu près réservés à des ingénieurs doublés de savants capables d'analyser les résultats et de les soumettre à 140 un calcul souvent complexe et difficile, même dans l'hypothèse d'une force électromotrice parfaitement sinusoïdale, de temps périodiques et de coefficients d'induction constants, et de résistances invariables. Malgré les complications apportées à la propagation des courants alternatifs par leurs propriétés spéciales, un moteur à courants alternatifs ne diffère pas essentiellement, en principe général, d'un moteur à courant continu : on y trouve toujours les deux mêmes parties principales : un champ magnétique ou *inducteur*, et un système *induit*, tournant l'un par rapport à l'autre ; mais tandis que le champ magnétique des 150 moteurs à courant continu est toujours *constant*, celui des moteurs à courants alternatifs est, suivant les cas, *constant*, *alternatif* ou *tournant*.

Ces différences dans la nature du champ inducteur peuvent servir de base à une classification des moteurs à courants alternatifs, déjà très nombreux et très variés, classification que résume le tableau ci-dessous ; elle indique ainsi, pour chacun des trois groupes principaux, les variétés importantes, et les principaux types de chaque variété :

160 CLASSIFICATION DES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

A.—Moteurs à champ constant ou moteurs synchrones

EXCITATION SÉPARÉE { *Aimants.*—Magnéto-alternateurs.
Électro-aimants.—Dynamo-alternateurs.

AUTO-EXCITATION . *Courant redressé.*—Zipernowsky.

B.—Moteurs à champ alternatif

Dynamo-série.—Moteurs à courant continu à inducteurs feuilletés.

Dynamo-shunt. — Moteurs à courant continu à inducteurs feuilletés.

Moteurs électrodynamiques.—Compteur E. Thomson.

170 *Champ partiellement redressé.*—Mordey.

Induit fermé.—E. Thomson.

C.—Moteurs à champ tournant

ALTERNATEURS ORDINAIRES OU À UN SEUL CIRCUIT		Ferraris. Tesla. Schallenberger. Hutin et Leblanc.
ALTERNATEURS A PHASES MULTIPLES OU A COURANTS POLYPHASÉS	*Trois fils et deux courants.*	Ferraris. Tesla. Borel.
	Trois fils et trois courants	Dalivo - Dobrowolsky et Brown. Haselwander. Bradley. Wenström.

180

E. HOSPITALIER,
Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de Paris.

II. CHIMIE.

La Reproduction Artificielle des Rubis.

Au moment où les recherches de MM. Fremy et Verneuil semblent démontrer que la production des rubis artificiels, applicables à la joaillerie, ne dépend plus que des expériences relevant du domaine de l'industrie, il peut paraître intéressant d'exposer un résumé des nombreux travaux que la solution de ce problème a nécessités. C'est ce que nous nous proposons de faire dans les lignes qui suivent :

I

Quoique la matière fondamentale du rubis, qui est le sesquioxyde d'aluminium, ait pu être obtenue cristallisée en suivant les procédés de la voie humide et de la voie sèche, ce sont les réactions par voie ignée qui ont donné les meilleurs résultats. La plus ancienne méthode par laquelle on ait reproduit le corindon (ou rubis incolore) par voie humide est dû à M. de Sénarmont ; elle consiste à chauffer vers 350° dans un tube de verre scellé, très épais et d'un faible diamètre intérieur, une solution d'alumine dans l'acide chlorhydrique. A côté de lames minces prismatiques formées d'une combinaison d'alumine et d'eau, que les minéralogistes nomment diaspore, on trouve, sur les parois du tube, des rhomboèdres de corindon incolores et microscopiques. Comme, dans les mêmes conditions, les chlorures de fer et de chrome, en se décomposant, n'abandonnent les oxydes correspondants que sous la forme de précipités amorphes, il est probable que la présence d'une petite quantité

de chlorure de chrome ne donnerait pas au corindon précipité la couleur rouge du rubis ni celle du saphir. C'est là un fait intéressant que le mémoire de de Sénarmont ne mentionne pas, mais qui mériterait d'être étudié.

M. Georges Friedel vient d'obtenir, également par voie humide, de jolis cristaux de rubis, par l'action dans un tube
30 d'acier boulonné, porté à une température de 530°, d'une solution de soude sur un grand excès d'alumine. Quand l'alumine contient un peu de chrome, la coloration du corindon est celle du rubis naturel.

Les recherches par voie sèche sont beaucoup plus nombreuses; je rappellerai d'abord les expériences dans lesquelles l'alumine prend naissance au sein d'un flux sans passer par l'état de composé volatil. Le premier résultat dans cette direction fut obtenu en 1837 par Gaudin, chercheur infatigable, doué de la plus vive originalité, qui conserve un rang distingué parmi les
40 chimistes de son époque et auquel nous serions redevables de travaux plus nombreux et plus remarquables encore s'il avait pu leur consacrer tout son temps. Il obtenait le corindon en chauffant à une très haute température, à l'aide du chalumeau oxyhydrique ou bien dans un violent feu de forge, de l'alun de potasse placé dans un petit creuset de noir de fumée fortement tassé. L'opération était terminée en quelques instants et la cavité du creuset contenait une masse scoriacée présentant des géodes aux parois constellées de petits cristaux très brillants de corindon. On admet généralement que c'est le sulfate et le
50 sulfure de potassium qui servent ici de fondants et déterminent la cristallisation de l'alumine; les réactions qui lui donnent naissance sont probablement plus complexes et en relation avec la décomposition lente de l'aluminate de potasse, qui se forme d'abord en grande quantité dans ces conditions.

En creuset fermé l'atmosphère est puissamment réductrice et, l'oxyde de chrome ajouté à l'alun étant réduit, l'alumine ne peut prendre la coloration rouge. Pour développer la teinte du rubis, il faut découvrir le creuset et maintenir le feu oxydant, mais en évitant la fusion de l'alumine. Ces petits rubis, isolés
60 de leur gangue par les acides, forment une poussière micros-

copique ayant toutes les propriétés du produit naturel. Ils ont été analysés par Malaguti.

Ebelmen en 1847 appliqua au corindon l'ingénieuse méthode qui lui permit de faire cristalliser un grand nombre d'oxydes à l'aide de flux volatils à haute température. Il employait particulièrement l'acide borique, le borax et les phosphates alcalins : un mélange composé d'une partie d'alumine calcinée avec trois ou quatre parties de borax, placé sur une feuille de platine repliée en forme de cuvette peu profonde, donne pendant la durée d'une cuisson de porcelaine, c'est-à-dire après trente heures environ, dont six de feu maximum, un grand nombre de petits cristaux transparents, très nets, microscopiques et doués d'une belle coloration rouge, si l'on a ajouté 1 °/₀ d'oxyde de chrome au mélange primitif. Ces cristaux sont accompagnés de longues aiguilles bleuâtres très abondantes surtout aux bords de la capsule et d'autant plus nombreuses que le feu a duré moins longtemps ; elles constituent un borate basique d'alumine.

L'acide borique employé dans les mêmes conditions laisse l'alumine absolument amorphe. Ebelmen attribuait cet insuccès à la trop grande volatilité de ce corps ; mais il ne me paraît pas douteux que la présence de l'alcali ne soit indispensable, comme le démontrent du reste les autres résultats obtenus par ce savant. Je crois, en partant de là, qu'on peut expliquer ainsi le mécanisme de la réaction qui donne naissance au rubis dans cette belle expérience d'Ebelmen : le système alumine et borax se partage en aluminate de soude, borate d'alumine et borax, suivant un équilibre en relation avec la température. A ce moment la volatilité du borax intervient pour diminuer la dose de ce corps qui limite les quantités de borate d'alumine et d'aluminate de soude présentes ; il en résulte que l'acide et la base de ces deux sels s'unissent à nouveau pour reformer du borax et rétablir l'équilibre primitif, tandis que l'alumine s'isole et cristallise. La disparition du borate d'alumine dans les expériences très prolongées me semble un argument en faveur de cette manière de voir.

L'addition de carbonates alcalins ou alcalinoterreux favorise beaucoup la cristallisation de l'alumine ; la silice agit de même

et dans les meilleures conditions. Ebelmen a pu obtenir des tables de plusieurs millimètres de côté, mais de très faible
100 épaisseur.

Debray s'est occupé à plusieurs reprises de la cristallisation de l'alumine. Suivant la première de ses méthodes, il obtenait le corindon en mettant à profit la volatilisation du chlorure de sodium formé par l'action de l'acide chlorhydrique gazeux sur l'aluminate de soude; dans une seconde série d'essais il arrive au même résultat par la décomposition du phosphate d'alumine à haute température, en présence d'un excès de sulfate de soude; on retrouve dans le creuset du phosphate alcalin tribasique, tandis que l'alumine est devenue libre presque intégralement,
110 ainsi que M. Grandeau l'a vérifié plus tard.

C'est à la même catégorie d'essais qu'il faut rapporter les jolies expériences de Parmentier sur la décomposition des molybdates doubles d'alumine et de potasse. Il a montré que lorsqu'on atteint une température suffisamment élevée, le sesquioxyde se précipite en totalité et, comme il se redissout en partie dans le flux lorsque la température baisse, il peut y avoir accroissement des cristaux par des réchauffements successifs, suivant un phénomène exactement inverse de celui qui se passe dans les cristallisations ordinaires où l accroissement du cristal déjà formé
120 a lieu pendant le refroidissement. Le corindon obtenu est en petites lames hexagonales peu épaisses.

Le premier procédé suivi par MM. Frémy et Feil, pour la production du corindon, remonte à une quinzaine d'années; il consiste à chauffer au rouge blanc pendant plusieurs heures dans un creuset siliceux un mélange à poids égaux d'alumine amorphe et d'oxyde de plomb additionné de deux à trois centièmes de bichromate de potasse. Il se produit une grande quantité d'alumine cristallisée surmontant une masse vitreuse de silicate de plomb et d'alumine qui gagne le fond du creuset; les auteurs
130 admettent que l'aluminate de plomb d'abord formé est décomposé par la silice du creuset qui s'empare de l'oxyde de plomb pendant que le rubis s'isole.

Les cristaux obtenus se présentent en lames excessivement nombreuses, très larges et peu épaisses, fortement agglomérées et

presque toujours souillées par une petite quantité de silicate mal séparé qui leur enlève une partie de leur éclat et s'oppose à ce que leur couleur un peu sombre prenne à la lumière artificielle la belle teinte pourpre si recherchée. Il y a lieu de remarquer ici que la formation des cristaux d'alumine en lames peu épaisses peut tenir à deux causes, soit à un développement trop rapide, 140 soit à la présence d'une impureté qui peut quelquefois, même à des doses très minimes, produire le développement excessif du cristal suivant l'un de ses axes au dépens des autres. Ne pouvant modifier le milieu, MM. Frémy et Feil dirigèrent les essais dans le sens qui devait déterminer le ralentissement de la cristallisation et poursuivirent avec persévérance l'étude de cette réaction en opérant sur des quantités de matière qui s'élevaient jusqu'à trente kilogrammes à la fois et dans des conditions où la température était maintenue constante pendant vingt jours consécutifs. Malgré cela, ces efforts sont jusqu'ici demeurés in- 150 fructueux et les masses considérables de rubis qu'il serait si facile d'obtenir ainsi restent sans application pour la joaillerie. Au cours de cet important travail, MM. Frémy et Feil ont *imité* la couleur du saphir en ajoutant à leur composition première une petite quantité d'oxyde de cobalt à la place du bichromate alcalin.

II

Les méthodes dans lesquelles l'alumine passe à l'état de composé volatil avant de cristalliser conviennent particulièrement à la production de cristaux très purs. Ce sont celles que je vais maintenant exposer. 160

A vrai dire, tous les procédés proposés jusqu'ici ne sont que des variantes de la célèbre expérience de H. Sainte-Claire Deville et Caron sur la décomposition du fluorure d'aluminium par l'acide borique ; mais les auteurs qui ont étudié postérieurement cette réaction ont différé soit dans la manière d'engendrer le fluorure, soit dans le choix de l'oxyde qui fait la double décomposition avec lui.

Le chlorure d'aluminium, quoique beaucoup plus facile à pré-
parer que le fluorure, n'a guère été employé pour la production
170 du rubis ; la violence avec laquelle la vapeur d'eau réagit sur lui
produit le plus souvent de l'alumine amorphe, car la décomposition
a déjà lieu à une température très inférieure à celle où les
cristaux de corindon peuvent s'engendrer. Aussi l'expérience de
Gay-Lussac, qui donne si aisément de beaux cristaux d'oligiste
par l'action de la vapeur d'eau sur le perchlorure de fer, n'a pu
être appliquée que très difficilement par M. Stanislas Meunier à
la production de petites lamelles hexagonales de corindon
obtenus en faisant passer au rouge un courant de vapeur d'eau
sur le chlorure d'aluminium.

180 Chacun sait que l'expérience de Deville et Caron consiste à
enfermer dans un creuset non siliceux une certaine quantité de
fluorure d'aluminium au-dessus duquel on suspend, en l'attachant
au couvercle, une petite capsule de platine remplie d'acide
borique desséché. Le creuset de charbon, contenant ces
matières, est placé dans une enveloppe siliceuse et protégé con-
venablement par une brasque de charbon de bois en poudre,
puis maintenu pendant une heure au rouge blanc. Après ce
temps tout le fluorure s'est volatilisé ; ses vapeurs, ayant ren-
contré l'acide borique, ont donné du fluorure de bore et du
190 corindon en magnifiques lames incolores ayant jusqu'à 1 centi-
mètre de côté ; mais, comme elles se sont formées très vite elles
manquent d'épaisseur. On ne peut obtenir la teinte du rubis
dans ce creuset réducteur, tandis que si ces mêmes matières
additionnées de fluorure de chrome sont chauffées dans un
creuset d'alumine, on assiste à la production du rubis, du saphir
et même du corindon vert ou émeraude orientale selon la quan-
tité de chrome employée et les circonstances de l'opération.
C'est la seule expérience qui, jusqu'à présent, ait permis de
reproduire ces deux dernières gemmes, sur la coloration des-
200 quelles plusieurs points restent encore à éclaircir.

Le procédé de M. Hautefeuille pour la production du corin-
don réalise des conditions analogues à celles dans lesquelles
Sainte-Claire Deville s'était placé pour reproduire l'oligiste. M.
Hautefeuille a fait agir un courant lent d'acide fluorhydrique sur

un mélange d'oxydes d'aluminium et de chrome maintenu au rouge orangé dans un tube de platine.

Après quelques heures d'action toute l'alumine est cristallisée parce que le fluorure d'aluminium et la vapeur d'eau engendrés en un point de l'appareil ont réagi en donnant une réaction inverse dans les parties où les conditions de température et de 210 masse sont un peu différentes ; en se reformant lentement ainsi, l'alumine cristallise, tandis que l'acide fluorhydrique reformé va continuer indéfiniment son action minéralisatrice.

A l'origine, tant qu'il y a de l'alumine amorphe à transformer, le phénomène est très rapide à cause de la surface d'action considérable ; il se ralentit ensuite, mais ne s'annule jamais, car, la vitesse d'attaque demeurant, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la surface, il est certain que les petits cristaux se corrodent au profit des plus volumineux qui s'accroissent lentement ; théoriquement, s'il était possible de maintenir pendant 220 longtemps dans un vase inattaquable et imperméable une masse donnée d'alumine et de gaz fluorhydrique, on ne devrait retrouver qu'un seul cristal de corindon représentant la totalité de l'alumine employée. Pour un grand nombre de causes que je ne puis analyser ici, on est bien loin d'obtenir ce résultat en pratique, mais l'expérience de M. Hautefeuille n'en constitue pas moins celle qui a donné pour la première fois des cristaux de rubis non seulement de la plus grande pureté, mais aussi présentant le développement de la forme cristalline dans toute sa perfection. 230

Tout récemment MM. Hautefeuille et Perrey ont démontré que l'acide chlorhydrique, que l'on croyait être tout à fait sans action sur l'alumine amorphe, peut minéraliser cet oxyde vers la température de 600° et que cette action minéralisatrice augmente beaucoup avec la tension sous laquelle le gaz chlorhydrique agit.

III

Le second procédé suivi par MM. Frémy et Feil repose sur
une réaction essentiellement différente de celle appliquée dans
le premier ; ces savants reconnurent l'action minéralisatrice
240 puissante que les fluorures exercent sur l'alumine et entrevirent
la possibilité de réaliser, dans les conditions ordinaires des
experiénces de creuset, l'action de l'acide fluorhydrique à haute
température qui exige habituellement des appareils de platine
très coûteux.

A la mort du regretté Ch. Feil cette étude était à peine
ébauchée ; elle fut reprise et continuée par MM. Frémy et
Verneuil, qui se proposèrent d'élucider le plus complètement
possible le mécanisme de cette intéressante réaction.

On reconnut d'abord que les fluorures alcalinoterreux sont
250 réellement ceux qui produisent le mieux la cristallisation de
l'alumine, lorsqu'ils sont employés purs et surtout exempts
d'hydrofluosilicates. Ces recherches préliminaires montrèrent
aussi que le fluorure de baryum était celui qui agissait de la
manière la plus intense, et c'est lui qui fut presque toujours
employé.

L'alumine s'obtenait par la calcination de l'alun d'ammoniaque
auquel on faisait perdre au petit rouge la majeure partie de ses
produits volatils ; puis on calcinait ensuite fortement le résidu,
afin d'en expulser la totalité de l'acide sulfurique.

260 Quelques centièmes de fluorure de baryum suffisent, à la
température du rouge blanc, pour transformer intégralement
l'alumine amorphe en corindon ; cette puissance minéralisatrice
s'explique aisément : M. Frémy a montré, il y a longtemps, que
les fluorures alcalinoterreux perdent au rouge une grande partie
de leur fluor à l'état d'hydracide sous l'influence de la vapeur
d'eau ; la série des phénomènes développés à propos de
l'expérience de M. Hautefeuille se réalise donc ici et se poursuit
jusqu'au moment où l'acide fluorhydrique, rencontrant la paroi
du creuset de terre, est définitivement pris à l'état de fluorure de
270 silicium, désormais inactif. Si l'acide fluorhydrique rencontre
en même temps de l'oxyde de chrome, il lui fait subir les mêmes

transformations, et les quelques millièmes de composé chromique, qui suffisent à colorer le corindon, produisent ici le rubis et quelquefois le saphir.

La vapeur d'eau nécessaire est amplement fournie par les gaz du foyer qui traversent la paroi du creuset, poreuse à l'origine de l'expérience, mais qui devient imperméable lorsque le mélange, vers la température du blanc naissant, a complètement vitrifié la paroi. Ce régime établi, une petite quantité de vapeur d'eau demeure captive et réagit indéfiniment. Quant à la baryte qui 280 provient de la décomposition du fluorure, nous la retrouvons combinée à l'état d'aluminate.

Les rubis obtenus ainsi ont été analysés ; ils ne contiennent pas de baryte et sont seulement formés d'alumine et d'oxyde de chrome ; ils rayent la topaze avec la plus grande facilité et M. Descloizeaux, qui en a fait l'examen cristallographique, les a trouvés identiques aux plus beaux cristaux naturels.

On pourrait croire, d'après cela, que pour obtenir de gros cristaux de corindon, il doit suffire d'ajouter plus de matière active, d'augmenter la quantité de fluorure de baryum. C'est là 290 une illusion que l'expérience détruit vite, car si l'on élève la dose de fluorure à partir d'une certaine limite, on assiste à la formation de combinaisons fluorées encore peu connues en raison des difficultés que leur séparation présente, tandis que les cristaux d'alumine deviennent plus rares, puis disparaissent tout à fait. D'après cela, les doses de 15 à 20 °/o de fluorure de baryum semblent celles qu'on ne peut avantageusement dépasser. Ces nouvelles expériences donnaient des rubis remarquables par leur pureté et la régularité de leur forme cristalline, et au point de vue scientifique, ce procédé pouvait prendre place à côté de ceux 300 déjà décrits ; son point faible résidait dans l'extrême dissémination de cristaux extraordinairement nombreux, mais fort petits ; la nutrition des cristaux déjà formés demeurait en effet presque insensible, soit à cause de la présence de la paroi siliceuse, soit par l'épuisement trop rapide de la matière fluorée. Cela devenait manifeste, surtout lorsqu'on opérait sur des masses plus grandes, dans l'espoir d'obtenir des cristaux plus volumineux ; on devait reconnaître alors que l'activité du produit minéralisateur s'épui-

sait dans un rayon très restreint, car les cristaux obtenus
310 n'étaient pas sensiblement plus développés que dans les expériences effectuées sur de petites masses.

IV

Un grand progrès fut réalisé le jour où MM. Frémy et Verneuil trouvèrent, après de très nombreuses expériences, que certains oxydes ajoutés à l'alumine produisent justement l'action si longtemps recherchée, c'est-à-dire la formation de géodes, ou nids cristallins, dans lesquels un petit nombre de cristaux relativement gros se forment à la place des poussières cristallines engendrées comme précédemment en nombre infini.

La chaux, la baryte, la strontiane, peuvent agir ainsi ; mais les
320 alcalis possèdent à ce point de vue une puissance bien supérieure à celle des alcalinoterreux ; la potasse ou la soude, mélangées, sous forme de carbonates, à l'alumine, deviennent de puissants auxiliaires pour la nutrition des cristaux. Ce n'est pas à la formation d'un fluorure alcalin qu'il faut rapporter l'action immédiate de ces bases, car les fluorures alcalins calcinés dans les mêmes conditions avec l'alumine amorphe n'engendrent pas de corindon et c'est pour cela qu'on doit faire un emploi judicieux du carbonate alcalin, car si on le mélange avec le fluorure de baryum et l'alumine, on paralyse en même temps
330 l'action minéralisatrice de l'acide fluorhydrique.

La condition, pour réussir, consiste simplement à séparer, dans le creuset, la partie qui donne naissance à l'agent actif de celle qui doit recevoir cette action.

On conçoit qu'une recherche dans laquelle le nombre des variables en jeu est aussi grand, ait nécessité des centaines d'expériences, d'autant plus qu'elles sont rendues souvent peu comparables par les énormes variations de température que présentent les fourneaux ordinaires de laboratoire ; contrairement à l'opinion accréditée on ne saurait croire à quel point les
340 moindres variations dans la pression atmosphérique, l'état hygrométrique de l'air et la direction du vent, peuvent modifier l'allure d'un four et quelles difficultés on éprouve à les compen-

ser par le jeu du registre ou l'état de la grille, lorsqu'il est nécessaire de maintenir la température constante. Les fours à gaz présentent donc pour ce genre d'essais une supériorité incontestable.

La température la plus favorable à la réaction est celle de 1350° environ. Lorsque l'expérience est bien réussie, on trouve les parties d'alumine qui ont subi à la fois l'action de l'acide fluorhydrique et de l'alcali, presque entièrement transformées en rubis. Ces derniers sont disposés soit isolément, soit par petits groupes dans les cavités de la matière devenue caverneuse et extrêmement friable; c'est généralement au fond du creuset, là où la couche de produit est plus épaisse, c'est-à-dire à l'endroit où l'acide fluorhydrique peut demeurer le plus longtemps sans rencontrer la paroi siliceuse, que l'on trouve les plus beaux cristaux; ils sont isolés, sans point d'attache et toujours complets. Rien n'est plus facile que de les séparer de leur gangue, car une simple lévigation entraîne toute la matière blanche peu dense, tandis que les rubis gagnent le fond du vase. On élimine les plus petits par le tamis.

Grâce à la netteté de leurs facettes qui présentent le plus beau poli, ils ont pu être montés sans avoir subi aucun travail de la part du lapidaire. Les plus grosses pierres obtenues en opérant sur une quantité de matière, ne dépassant pas quinze cents grammes, ont environ quatre millimètres et demi d'epaisseur et pèsent soixante-quinze milligrammes, soit un peu plus d'un tiers de carat; elles se comportent en joaillerie exactement comme les plus beaux rubis naturels de même taille.

Si l'on se reporte aux conditions dans lesquelles ces derniers résultats ont été acquis, il semble bien probable qu'en consacrant de nouveaux efforts à l'étude de cette question, on arrivera à produire des pierres beaucoup plus volumineuses. Les expériences qui précèdent montrent déjà qu'il faudra s'efforcer de ralentir la réaction en opérant à une température aussi basse que possible, car c'est en effet de cette donnée que paraît dépendre la plus ou moins grande épaisseur des cristaux; il faudra d'autre part éviter la formation des corps vitreux qui englobent contre les parois du creuset les premiers cristaux formés, ceux par con-

380 séquent qui sont le mieux placés pour acquérir le développement maximum. La dissémination extrême des cristaux obtenus jusqu'ici a pour cause principale le déplacement incessant des zones actives; il en résulte que les cristaux formés ne demeurent pas pendant un temps suffisant dans les conditions où ils peuvent s'accroître.

Comme on le voit, il y a encore beaucoup de difficultés à aplanir et l'on ne peut espérer arriver à les surmonter qu'en disposant dès à présent de ressources très supérieures à celles d'un laboratoire scientifique, c'est-à-dire en se plaçant dans les con-
390 ditions de l'industrie. Les dernières expériences de MM. Frémy et Verneuil démontrent que la grosseur des cristaux obtenus est fonction des masses réagissantes, ainsi que cela s'observe dans la plupart des cas. Il devient donc fort probable que lorsqu'on opérera sur une centaine de kilogrammes de matière, on obtiendra des pierres du poids d'un ou de deux carats. Leur bas prix mettra alors à la portée de tous ces belles gemmes réservées jusqu'ici à quelques privilégiés.

A. Verneuil, *Revue Générale des Sciences.*

Revue Annuelle de Chimie Appliquée.

La Grande Industrie Chimique.

I

Deux découvertes importantes en chimie inorganique ont marqué la fin de l'année 1890: celle de l'acide azothydrique due à M. Curtius et celle de l'oxycarbure de nickel due à MM. Mond, Langer et Quincke. La description de ces composés intéressants n'appartient pas, à proprement parler, à une revue de chimie appliquée. Il importe cependant de s'y arrêter quelques instants, car le second de ces corps, tout au moins, semble appelé à jouer un certain rôle dans la pratique. On ne connaissait pas jusqu'à présent un bon agent capable de retirer
10 tout l'oxyde de carbone contenu dans un mélange gazeux. Il se peut que le nickel métallique soit appelé à remplir ce but.

Bien des progrès restent évidemment à faire pour que cette réaction puisse être réellement employée en grand. Mais si la chose est possible, il faut reconnaître que tous les éléments du succès se trouvent réunis dans la collaboration de MM. Mond, Langer et Quincke: d'un côté de jeunes et habiles chimistes, dont l'un, M. Langer, s'est déjà fait connaître par ses remarquables 'recherches pyrochimiques' exécutées avec M. V. Merer à l'École polytechnique de Zurich; de l'autre côté, un grand industriel animé du désir d'apporter le précieux et généreux concours de moyens mécaniques puissants et des ressources pécuniaires indispensables pour de semblables recherches.

A première vue l'emploi du nickel pour l'absorption de l'oxyde de carbone soulève cependant une objection: la mise en pratique d'un pareil procédé serait inévitablement accompagnée de pertes de l'agent absorbant, métal encore assez rare et d'un prix plutôt élevé. Mais cette objection perd aujourd'hui beaucoup de sa valeur, depuis que l'on a découvert les minerais de Sudbury, au Canada, dont la richesse en nickel dépasse celle des minerais de la Nouvelle Calédonie. Ces gisements sont considérables et doivent se prêter à une exploitation facile, ainsi que l'auteur de cette revue a pu s'en convaincre sur les lieux mêmes, il y a quelques mois à peine.

Une des applications les plus importantes que l'on pourrait faire de l'absorption de l'oxyde de carbone contenu dans un mélange gazeux serait évidemment la purification du gaz d'éclairage, qui renferme toujours une quantité appréciable de ce composé dangereux. Avec plus de raison encore, on peut espérer venir ainsi à bout des difficultés qui se sont opposées jusqu'à présent à l'emploi général du *gaz d'eau* pour le chauffage et l'éclairage (lumière incandescente). On sait en effet que la grande toxicité du gaz d'eau,—mélange impur de H et de CO,—provient de sa forte teneur en oxyde de carbone. Si l'on parvenait, sans frais trop considérables, à éliminer complètement ce dernier (pour l'employer ensuite sous une autre forme), on obtiendrait de l'hydrogène presque pur, utilisable aux lieu et place du gaz d'éclairage ordinaire, pour les usages domestiques, les services publics, etc.

II

Ces considérations nous amènent tout naturellement à exami-
50 ner jusqu'à quel point se sont réalisées les grandes espérances que l'on avait fondées sur l'emploi du gaz d'eau. L'opinion lui est généralement moins favorable aujourd'hui qu'il y a quelques années. Nous sommes loin des prétentions de ceux qui voyaient dans ce produit le 'combustible de l'avenir' destiné à remplacer le gaz des gazogènes, le gaz de houille et même la houille, aussi bien dans l'industrie que pour les usages domestiques. Dans tous les cas où il s'agit d'utiliser aussi complètement que possible une quantité donnée de chaleur, on a reconnu que la préparation du gaz d'eau est non seulement inutile, mais plus coûteuse que
60 la combustion directe du charbon ou sa transformation en gaz au moyen des gazogènes ordinaires.

Il y a cependant un cas où l'emploi accessoire de l'eau peut rendre des services, c'est lorsqu'il s'agit de faire marcher les gazogènes d'une façon continue. On sait en effet que la préparation du gaz d'eau proprement dit s'opère en alternant les deux opérations suivantes : 1° diriger de la vapeur d'eau surchauffée sur du charbon porté au rouge, d'où résulte un abaissement de température en relation avec la chaleur absorbée par la décomposition de l'eau ; 2° ranimer la combustion par un
70 courant d'air, ce qui a pour effet de relever la température et de la ramener à ce qu'elle était avant la première opération.

Le gaz produit dans cette seconde phase est très voisin, par sa composition, du gaz des gazogènes appelé 'gaz Siemens' ou 'gaz d'air.' Il est cependant rare qu'on l'utilise d'une façon complète, et, dans bien des cas, il était même entièrement perdu. En réglant convenablement la quantité d'eau employée, de telle façon que la température ne tombât pas en dessous d'un certain minimum, on est parvenu à obtenir d'une façon continue un mélange gazeux contenant, en volumes, 20-25 % d'oxyde de
80 carbone et 10-15 % d'hydrogène. C'est à ce mélange qu'on a donné le nom de 'gaz mixte' ou de 'demi-gaz d'eau.' Parmi les appareils nouveaux construits sur ce principe, il faut mentionner ceux de Schilling, de Siemens, de Dowson et Wilson. Tous

donnent une solution rationnelle du problème du chauffage, car ils produisent sans augmentation de frais un gaz plus riche que celui des gazogènes ordinaires, capable de donner une flamme de température plus élevée, et dont l'emploi est particulièrement approprié aux moteurs à gaz.

Il convient d'examiner aussi deux cas où le gaz d'eau avait paru présenter de tels avantages sur les autres combustibles, que, 90 malgré son prix de revient élevé, son emploi semblait devoir se justifier complètement; nous voulons parler de la production des hautes températures et de l'éclairage. En ce qui concerne la première de ces applications, il faut distinguer deux alternatives :

Ou bien il s'agit de produire des températures très élevées que l'on ne peut atteindre avec nos moyens actuels. Tel est le cas de la soudure des tuyaux en fer ondulé, pour laquelle le gaz d'eau ne peut être remplacé par aucun autre agent. Il en sera de même dans l'avenir pour toutes les opérations analogues. 100

Ou bien au contraire il s'agit de produire des températures moins élevées, que l'on peut réaliser par nos moyens actuels, mais avec un faible effet utile. La fabrication de l'acier par le procédé Siemens-Martin nous en fournit un exemple. Jusqu'à présent les tentatives faites en vue d'y appliquer l'emploi du gaz d'eau ne paraissent pas avoir été très heureuses. La Société des Hauts-Fourneaux de Wittkowitz (Silésie autrichienne) avait annoncé qu'elle obtenait ainsi des résultats remarquables. Dans le même but, on avait construit à Hoerde, en Westphalie, les plus grandes installations qui aient été créées jusqu'à présent 110 pour la production du gaz d'eau.

Or, voici que l'on annonce cette année l'abandon de toutes les installations de Wittkowitz. D'autre part, on ignore encore les résultats obtenus à Hoerde depuis un an et demi que fonctionne le gaz d'eau. Si ces résultats répondaient à tout ce qu'on en attendait, on n'aurait pourtant pas manqué de les faire connaître. Enfin, en Angleterre, M. J. von Langer, ancien ingénieur des établissements de Wittkowitz, est bien parvenu à fonder, avec l'appui de capitaux considérables, une Société pour l'exploitation de ses brevets relatifs à la préparation du 120

gaz d'eau. Mais, encore ici, les résultats obtenus ne sont pas en rapport avec les espérances ou les promesses auxquelles on s'était laissé aller. De toutes ces tentatives il faut donc conclure que dans les conditions économiques de l'industrie européenne, le gaz d'eau n'est pas appelé à jouer le rôle important qu'on lui avait prédit pour la production des hautes températures.

En ce qui concerne son emploi pour l'éclairage, les progrès réalisés en Europe ne sont pas non plus très encourageants. On avait cru momentanément, qu'appliqué à la production de la 130 lumière incandescente (autrefois avec le platine, aujourd'hui avec la magnésie), le gaz d'eau était destiné à remplacer le gaz d'éclairage. De simples considérations d'hygiène s'opposent déjà à cette application dans les localités où ce gaz serait distribué au moyen d'un réseau de canalisation. Il est en effet cinq à huit fois plus toxique que le gaz d'éclairage, et, d'autre part, on n'est pas encore parvenu à lui donner une odeur caractéristique et persistante comme celle du gaz des cornues.

Au reste, une discussion sur cette matière entre les défenseurs du gaz d'eau et les administrations responsables de la santé 140 publique ne prouvera jamais rien, tant que les premiers n'auront pas démontré pourquoi les grands établissements industriels ne donnent pas au gaz d'eau la préférence sur le gaz de houille pour tout ce qui concerne l'éclairage. On sait pourtant que ces établissements ne dépendent pas des autorités et qu'ils préparent eux-mêmes, d'une façon régulière, le gaz d'éclairage nécessaire à leurs besoins. L'auteur de cet article avait autrefois fort bien auguré du succès du gaz d'eau pour la production de la lumière incandescente à la magnésie, tout en laissant absolument réservé le côté hygiénique de la question. Les faits sont encore loin 150 d'avoir répondu à son attente.

Une dernière remarque, enfin, sur l'emploi du gaz d'eau dans l'Amérique du Nord, où il serait parvenu à remplacer le gaz d'éclairage dans un tiers environ des localités. Indépendamment du fait qu'en Amérique l'industrie est beaucoup moins entravée qu'en Europe par des considérations d'hygiène, l'emploi du gaz d'eau n'est pas sans présenter une ombre au tableau ; on s'émeut vivement de la fréquence des accidents.

En outre, il ne faut pas oublier que le côté économique de la question se présente d'une façon tout autre que chez nous. Ce que l'on appelle en Amérique « gaz d'eau » est fort différent du 160 produit que nous désignons sous ce nom. Nous entendons par là un mélange gazeux, presque inodore, contenant en volumes, environ 50 % d'hydrogène et 40 % d'oxyde de carbone, mélange qui brûle avec une flamme non lumineuse et ne peut par conséquent être employé que pour la production de la lumière incandescente. Sous ce même nom les Américains désignent un mélange de « gaz d'eau » pur (préparé au moyen de leur excellente anthracite) avec 20-30 % d'hydrocarbures provenant des résidus lourds du raffinage des pétroles ; cette matière première fait totalement défaut dans l'Europe occiden- 170 tale. Le gaz américain possède une odeur pénétrante, brûle avec une flamme très lumineuse, et, vu le prix relativement bas des charbons bitumineux en Amérique, il présente, vis-à-vis du gaz de houille des avantages réels que la lumière incandescente à la magnésie est loin d'offrir en Europe. On voit par là qu'il ne faut pas songer à établir une comparaison quelconque entre les produits désignés sous le nom de gaz d'eau en deçà et au delà de l'Atlantique.

Les considérations détaillées dans lesquelles nous sommes entrés au sujet de ce chapitre fort important des combustibles 180 gazeux, nous obligent à mentionner simplement divers problèmes de même nature qui ne manquent pas non plus d'intérêt. Tels sont les travaux entrepris aux États-Unis pour l'utilisation des gaz naturels comme combustibles, les questions qu'on se pose sur la durée de ces sources merveilleuses ; enfin, dans un autre ordre d'idées, les résultats heureux obtenus par M. Mond pour produire simultanément l'ammoniaque et le gaz à chauffer.

III

Nous passons maintenant à une autre question d'un grand intérêt également, tant pour l'industrie chimique que pour l'industrie en général ; nous voulons parler de la préparation 190 économique de l'oxygène à partir de l'air atmosphérique. On

se rappelle que le procédé Marguerite consistait à transformer
la baryte en peroxyde par grillage à l'air, et à regénérer ensuite
l'oxygène et la baryte par l'action d'une chaleur plus intense.
Deux chimistes français, les frères Brin, ont considérablement
perfectionné cette méthode, encore améliorée depuis par la
compagnie anglaise qui a repris leurs brevets. On doit tout
particulièrement aux ingénieurs de cette société d'avoir trans-
formé la méthode Marguerite en un procédé à marche continue.
200 Au lieu d'avoir recours à des températures fort différentes pour
fixer l'oxygène de l'air sur la baryte et pour l'en dégager, ils
sont arrivés au même résultat en opérant à température cons-
tante, mais en faisant varier la pression dans les appareils.
D'autre part, le chimiste de le Société anglaise, M. Thorne
s'est efforcé de trouver de nouvelles applications techniques du
gaz oxygène : des perfectionnements dans la purification du gaz
d'éclairage, l'emploi de l'oxygène pour le blanchiment des
matières textiles et de la pâte de papier, pour la transformation
des huiles siccatives en vernis, tels sont les premiers résultats de
210 ces recherches que d'autres suivront certainement.

Une découverte de M. Kassner promet encore davantage en
ce qui concerne la fabrication de l'oxygène à bon marché. Si
l'on chauffe au rouge un mélange d'oxyde de plomb et de carbonate
de chaux, on obtient du plombate calcique $Ca\ Pb\ O^3$, qui, sous
l'action de l'acide carbonique abandonne de l'oxygène, tandis
que le calcium et le plomb sont ramenés à leur état initial,
carbonate de chaux et oxyde de plomb, prêtes à être utilisés
pour une nouvelle opération. Bien que l'inventeur fonde de
grandes espérances sur l'influence que sa découverte peut avoir
220 dans l'industrie, il convient cependant d'attendre que ce nouveau
procédé soit entré dans la pratique, pour en estimer raisonnable-
ment la valeur.

IV

Dans le domaine de la grande industrie chimique proprement
dite,—c'est-à-dire, fabrication de l'acide sulfurique, de l'acide
chlorhydrique, du sulfate de soude, de la soude, du chlore, de
l'acide nitrique, etc.,—il n'y a à mentionner aucune transforma-

tion technique fondamentale. Ce qu'il y aurait à dire des découvertes les plus importantes remonte aux années précédentes, comme le procédé Chancel pour la régénération du soufre des résidus de soude, ou bien est de date si récente que 230 l'avenir seul permettra d'en apprécier la valeur. C'est pourquoi nous donnerons ici la première place non pas aux questions techniques, mais bien à un fait d'ordre commercial d'une signification très importante: la réunion de toutes les plus grandes fabriques anglaises utilisant le procédé Leblanc, en une vaste compagnie, *United Alkali Company*, *Limited*. Les maisons les plus renommées: Tennant, Muspratt, Kurtz, Gaskell et Deacon, Sullivan, Allhusen, Jarrow, et une quantité d'autres ont ainsi subitement disparu. Leurs propriétaires ne sont plus qu'actionnaires ou administrateurs de la nouvelle société. Les 240 seules fabriques anglaises qui aient conservé leur autonomie sont les maisons Gamble et Chance. Cette suppression de toutes les individualités dans un pays qui avait toujours marché à la tête de l'industrie de la soude est un événement sans précédent dans l'histoire de la chimie appliquée. Aura-t-il pour effet de renforcer ou d'affaiblir l'esprit d'invention et d'initiative? Les deux alternatives sont possibles; l'avenir seul en décidera.

Un fait est cependant certain; c'est que la fondation de l'Alkali United Company, Limited, doit être considérée comme une tentative d'accaparement ou plutôt comme une ligue de 250 défense dirigée contre la concurrence énergique faite au procédé Leblanc par les procédés à l'ammoniaque de Solvay. Bien qu'en apparence il ne se soit produit aucun changement important dans le dispositif des appareils Solvay, les fabriques syndiquées qui en font usage ont pris un développement considérable dans toutes les grandes régions industrielles. De plus, le procédé Schlœsing, bien qu'installé plus modestement, donne de bons résultats. Enfin, il existe, en Allemagne surtout, plusieurs fabriques indépendantes qui travaillent d'après le procédé ammoniaque. Depuis longtemps les défenseurs du 260 procédé Leblanc avaient regardé la partie comme perdue en ce qui concerne la soude calcinée (sel de soude), et avaient voué tous leurs soins à la fabrication de la soude caustique pour

laquelle ils avaient une certaine avance. Mais, même sur ce terrain, les fabriques Solvay avaient peu à peu engagé une lutte énergique et porté des coups sensibles à leurs concurrents. Aussi, depuis plusieurs années déjà, les fabriques utilisant les procédés Leblanc avaient été obligées en quelque sorte de renverser les rôles de leur fabrication, et de reléguer la soude, et
270 même la soude caustique, au rang de produits secondaires dont les prix restaient entre les mains des fabriques Solvay. En même temps, plusieurs fabriques anglaises et quelques maisons françaises donnaient toute leur attention à la préparation de l'acide chlorhydrique, laissée jusqu'alors au second plan.

Le chlore qu'on en retire, ou plutôt les dérivés solides qu'on prépare avec ce gaz, soit le chlorure de chaux et le chlorate de potasse, devaient leur fournir un bénéfice modéré, ou tout au moins diminuer leurs pertes. De fait, ni M. Solvay, ni ses émules, n'ont encore obtenu aucun résultat dans toutes leurs
280 tentatives pour adapter à leur système cette branche des produits chlorés, tentatives basées, on le sait, sur l'utilisation du chlore contenu dans leurs résidus de chlorure de calcium. L'auteur de cette revue a du reste démontré par des considérations thermochimiques que l'on ne pouvait guère compter sur une solution économique de ce problème, attendu que le chlorure de calcium présente à peu près la même stabilité que le sel marin.

Cette fabrication des produits chlorés,—dernier retranchement des procédés Leblanc, dont ils sont la raison d'être,—a été sérieusement menacée par les inventeurs qui cherchent à
290 préparer le chlore au moyen du chlorure de magnésium, composé tout à fait apte à ce genre de réactions. A vrai dire, il n'y aurait pas eu là de quoi inquiéter les fabriques Leblanc, si la préparation du chlorure de magnésium devait être entreprise, comme on l'a plusieurs fois proposé, par les fabriques Solvay. Mais on sait qu'en réalité il en est tout autrement: le chlorure de magnésium à l'état de solution concentrée est obtenu à Stassfurt, comme sous-produit, sans valeur, résultant de la fabrication des sels de potassium. Ces solutions sont en quantités plus que nécessaires pour suffire largement à toute
300 la consommation de chlore qui se fait actuellement sur la surface

du globe ; elles deviennent de plus en plus encombrantes ; on ne sait comment s'en débarrasser, surtout en présence des exigences croissantes des autorités sanitaires. Le fait que l'on puisse vendre quelques milliers de tonnes de chlorure de magnésium ne change naturellement rien à cette situation. Il n'en est cependant pas moins certain que la préparation du chlore par le procédé Weldon-Péchiney devait trouver à Stassfurt son vrai centre d'activité, si les résultats en étaient bien établis. De fait, les fabricants de Stassfurt se sont opposés à l'introduction de ces nouvelles et ingénieuses méthodes ; elles leur ont 310 paru trop compliquées ; le succès leur a semblé douteux ; ils ont préféré suivre leur propre voie qui devait, dit-on, les conduire à un meilleur résultat. Jusqu'à présent ils n'en ont pas donné la preuve ; leurs essais actuels, pas plus que ceux tentés précédemment, n'ont fourni une solution précise et définitive de la question.

Il y a quelques années encore, il était incontestablement reconnu que les produits chlorés du monde entier étaient préparés, à de rares exceptions près, par les fabriques Leblanc qui trouvaient là leur principale source de bénéfices. Une ère 320 nouvelle a semblé s'ouvrir pour ces fabriques par suite du succès éclatant obtenu par le procédé Chance : cette méthode permettrait de retirer du soufre des résidus de soude, et cela, à un prix quatre à cinq fois inférieur à celui du soufre des pyrites. Ainsi se trouverait fermé le cycle ingénieux de réactions dont les phases principales ont été découvertes par Nicolas Leblanc. Ce résultat devait assurer pour longtemps à tout le système une vitalité complète. Malheureusement le procédé Chance n'est pas sans présenter encore quelques ombres. Entre des mains moins habiles que celles de l'inventeur, la mise en œuvre de 330 masses énormes de gaz sulfhydrique présente de grandes difficultés pratiques. Même au point de vue économique, la méthode ne semble pas avoir tenu tout ce qu'elle avait promis. On peut et doit cependant espérer que ces difficultés pourront être atténuées par une plus longue expérience, si ce n'est même entièrement vaincues.

Parmi les nombreux et nouveaux procédés proposés pour la

préparation du chlore, tous ceux qui reposent sur l'emploi de l'acide chlorhydrique gazeux ou liquide ne sont en aucune 340 manière dirigés contre le procédé Leblanc, mais seulement contre les méthodes Weldon ou Deacon, étroitement liées du reste avec celui-ci. Depuis longtemps la supériorité de la méthode Deacon a été reconnue ; elle se trouve encore accrue par le système de M. Hasenclever pour l'utilisation des acides impurs des fours, dont on peut déplacer l'acide chlorhydrique au moyen de l'acide sulfurique. Bien qu'il s'agisse là d'un fait définitivement acquis, la plupart des fabriques ont conservé la méthode Weldon, parce que les frais d'installation du procédé Deacon les effraient et que d'autre part, à chaque instant on 350 annonce de nouvelles méthodes réputées encore supérieurs. Il serait presque impossible d'analyser tous les nouveaux systèmes proposés. Une pareille étude ne présenterait du reste pas grand avantage, attendu que jusqu'à présent, aucun de ces systèmes n'est sorti de la période d'essais. On remarquera toutefois que les procédés reposant sur la réaction (découverte par Schlœsing) entre le bioxyde de manganèse, les acides chlorhydrique et nitrique, sont actuellement les plus en vue, notamment depuis que la récupération de l'acide nitrique des vapeurs nitreuses peut s'opérer d'une façon complète au moyen des *colonnes à plateaux*.

360 Le chlore, ce gaz tant redouté dans l'industrie par suite de ses actions corrosives et de sa toxicité, est maintenant au nombre des produits livrés dans des récipients en fer où on le liquéfie par le froid et la compression. C'est là un fait digne de remarque. Le chlore liquide est donc à ajouter à la liste des gaz liquéfiés préparés industriellement : acide carbonique, ammoniaque, acide sulfureux, chlorure de méthyle, et oxygène comprimé à 100 atm. Sous cette forme, le chlore se prêtera plus facilement à de nouvelles applications.

Dans cet ordre d'idées, il se pourrait aussi que la belle décou- 370 verte des tubes laminés de Mannesmann ait une réelle importance. A résistance égale, ces tubes sont cinq fois plus légers que les tubes soudés ; ils rendront certainement des services soit pour le transport des gaz liquéfiés, soit pour les réactions qui se font sous pression.

Tandis que les fabriques Leblanc et Solvay, et avec elles nombre d'inventeurs espèrent trouver la fortune dans la découverte de procédés chimiques pour la préparation de la soude et du chlore, l'électricité, qui n'avait pas inspiré jusqu'à présent de craintes sérieuses, semble entrer sérieusement en lice. Il y a un an à peine, la décomposition des chlorures par le courant élec- 380 trique n'était pas un problème résolu. En réalité, la question était restée bornée à des essais d'une portée restreinte. Par exemple, on voyait figurer à l'Exposition de 1889 du chlorate de potasse préparé par voie électrolytique d'après une méthode imaginée par M. Gall et le comte de Montlaur. Déjà, à cette époque, l'auteur de cette revue avait pu se convaincre qu'il s'agissait bien là d'un procédé industriel sérieux, fonctionnant en demi-grand. Depuis, ces inventeurs ont fondé dans la Suisse française une fabrique utilisant 700 chevaux de force, qui livre maintenant du chlorate de potasse d'une façon régulière. 390

Cette solution du problème ne concerne cependant qu'un produit de consommation limitée. Il était encore beaucoup plus important de chercher à dédoubler les chlorures alcalins en soude (ou potasse) et en chlore, pour utiliser ensuite ce dernier sous une autre forme. Cette question était toujours restée sans solution pratique. Elle paraît cependant avoir fait un très grand pas dans le courant de l'année 1890 à la suite des recherches faites par la fabrique Griesheim à Francfort-sur-Mein. On y pratique actuellement en grand la décomposition électrolytique du chlorure de potassium qui sert ainsi à préparer la 400 potasse et le chlorure de chaux. On prétend que toutes les difficultés auraient été surmontées et qu'en principe le même traitement serait applicable au sel marin. Il est difficile de dire à quelle époque ce traitement du chlorure de sodium entrera réellement dans le domaine des faits. Il n'y aurait, en effet, rien d'étonnant à ce que dans ce moment-ci la décomposition électrolytique du chlorure de sodium ne pût se faire à des conditions assez économiques pour lutter avec les anciennes méthodes. L'électrotechnique demande en effet à être encore travaillée et perfectionnée par un ensemble de recherches 410 pratiques et scientifiques.

Dans un ordre d'idée très voisin on a proposé d'employer l'électrolyse pour le blanchiment des fibres textiles et de la pâte de papier. Des nombreux essais tentés dans cette voie les plus connus jusqu'à présent sont ceux de L'Hermite. Malgré la réclame considérable faite à leur sujet, ils n'ont pas eu de succès pratique durable.

Peut-être les procédés Kellner auront-ils plus de chance. Attaquant hardiment le problème, cet inventeur électrolyse le 420 sel marin en solution pour produire dans la masse même à traiter les ingrédients nécessaires au blanchiment, la soude et le chlore. Il doit y avoir là de grandes difficultés d'installations à vaincre. D'après ce que l'on sait des premiers résultats obtenus en Angleterre par une des plus grandes fabriques de papier de ce pays, il faudrait croire qu'ils sont tout particulièrement favorables. On voit par là que l'année 1890 ne nous apporte aucune solution définitive; il est même prématuré d'en attendre une en 1891. Quoi qu'il en soit, si des procédés de ce genre devaient se généraliser, l'industrie du chlorure de chaux 430 verrait se fermer un de ses principaux débouchés.

La fabrication de l'acide sulfurique passait autrefois—et avec raison,—pour la base indispensable de la grande industrie de la soude; aujourd'hui, elle perd peu à peu cette position et la perdra probablement tout à fait dans un avenir plus ou moins rapproché. La moitié environ de la soude consommée dans le monde entier ne se prépare plus au moyen du sulfate de soude, mais bien directement, à partir du sel marin; et pourtant, fait 440 étonnant, la production totale d'acide sulfurique, bien loin de diminuer, est en augmentation continuelle. De fait, l'acide employé autrefois pour la préparation du sulfate a trouvé un vaste débouché dans la fabrication des superphosphates. Les *engrais artificiels* constituent, à l'heure actuelle, une des branches importantes de l'industrie chimique; ils sont du reste destinés à prendre encore une grande extension par suite de la découverte des gisements de phosphates de la Somme, de la Floride (Amérique du Nord), etc. Enfin, bien qu'on puisse tirer parti des scories du procédé Thomas,—(source très importante d'acide 450 phosphorique)—après un simple broyage et sans leur faire subir

aucun traitement chimique, on trouvera encore de larges emplois de l'acide sulfurique dans le traitement des phosphates minéraux et du noir animal, dans la préparation de l'acide nitrique. Cette dernière application devient considérable, non seulement pour obtenir l'acide nitrique pur, mais aussi pour préparer les mélanges nitriques des deux acides, mélanges employés en grand dans deux industries différentes: la fabrication des couleurs artificielles et celle des explosifs. Cet ensemble de débouchés variés nous expliquent pourquoi la production de l'acide sulfurique est destinée à suivre pendant longtemps encore une marche 460 ascendante.

Il y aurait à enregistrer de nombreux perfectionnements apportés soit aux appareils, soit aux manipulations concernant la fabrication de l'acide sulfurique. L'auteur a pu s'en convaincre en réunissant les matériaux nécessaires à la rédaction de son nouveau traité sur la question,—traité qui doit paraître prochainement en Angleterre. Cependant, il n'y a à mentionner aucune modification fondamentale qui puisse intéresser les lecteurs de cette *Revue*. Les perfectionnements qui ont été proposés de divers côtés, en particulier par l'auteur, doivent 470 encore subir la sanction d'une plus longue expérience. Il suffira donc de rappeler que ces propositions ont été fondées sur une nouvelle théorie de la formation de l'acide sulfurique, théorie, qui a été développée d'abord par l'auteur, et, peu après d'une façon tout a fait indépendante, par M. Sorel. Fait digne de remarque, des essais pratiques dans cette même voie avaient été tentés, il y a déjà plusieurs années, avec peu de succès du reste, parce que les conditions essentielles du procédé n'étaient pas encore bien connues.

On abandonne complètement aujourd'hui, comme n'étant plus 480 soutenable, la théorie donnée par M. Raschig sur la formation de l'acide sulfurique; on se rappelle que, d'après cette conception, dont la hardiesse avait frappé l'imagination de bien des chimistes, il faudrait admettre que l'acide sulfurique se forme aux dépens de dérivés hypothétiques de l'hydroxylamine.

La fabrication de l'acide sulfurique fumant continue à faire des progrès en Allemagne. Elle est restée stationnaire en

Angleterre et ne s'est pas encore acclimatée en France. Malgré tous les mystères dont on entoure cette question, on sait 490 aujourd'hui que la plus grande partie de l'acide sulfurique fumant est préparée synthétiquement par le procédé C. Winkler: réaction de contact de l'acide sulfureux et de l'oxygène en présence de la mousse de platine chauffée. Les diverses installations ne diffèrent que sur des points de détails. Les uns emploient les gaz des fours à pyrite, les autres, au contraire, de l'acide sulfureux pur que l'on peut du reste retirer par la méthode Schröder-Hänisch des gaz pauvres des fours à pyrites. Ce dernier procédé a doté l'industrie d'un nouveau produit, le gaz sulfureux liquide que l'on expédie dans de forts récipients en 500 fers ou dans des wagons spéciaux d'une contenance de 10,000 kilos. Les fabriques de sulfites, de cellulose à sulfite, les maisons de blanchiment, les fabriques employant des machines frigorifiques, trouvent là une matière première facile à manier, qui, pour le moment, ne se fabrique en grand qu'en Allemagne.

Le développement considérable de l'industrie des explosifs a donné une vigoureuse impulsion à la fabrication de l'acide nitrique. Depuis l'introduction des poudres sans fumée, cet acide tend à remplacer peu à peu le salpêtre et sa préparation a été l'objet de plusieurs perfectionnements, parmi lesquels il 510 convient de citer ceux dus à M. Guttmann relatifs à la condensation. Plusieurs autres améliorations qui se sont produites dans des établissements d'État, sont encore tenues secrètes.

Le nombre des nouveaux explosifs croît avec une rapidité vertigineuse. Aujourd'hui on préconise l'emploi de l'éther sulfurique pour telle ou telle composition; demain, on ne voudra plus que de l'éther acétique, dont le succès n'aura pas une plus longue durée. Entre temps, on installe de grandes fabriques pour la préparation de ces produits auxiliaires, et, avant même qu'elles aient commencé à fonctionner, on signale 520 de nouvelles inventions qui font abandonner complètement ces produits pour les remplacer par d'autres destinés à subir probablement le même sort. C'est une véritable fièvre.

Les poudres sans fumée sont toujours en honneur. Il est difficile de prévoir quelle sera la solution définitive donnée à ce

problème. En ce moment les compositions d'Abel et Dewar en Angleterre, de Nobel dans d'autres pays sont peut-être au premier rang des découvertes récentes.

Parmi les produits nouveaux touchant à la grande industrie, il convient de citer enfin la découverte de l'alun de soude de M. Augé. On ne peut encore se prononcer définitivement sur 530 l'importance technique de cette invention.

V

Nous terminerons cette revue par quelques considérations sur un métal dont la préparation sort du cadre des procédés métallurgiques usuels, et que nous avons par conséquent bien le droit de rattacher à l'industrie chimique : nous avons nommé l'aluminium. On sait que ce corps remarquable a été préparé pendant de longues années à Salindres (Gard) par le procédé de laboratoire de Wöhler et Deville. Les applications en étaient restées fort limitées.

Subitement, ces dernières années, ce métal a pris un tout 540 autre rang dans l'industrie chimique aussi bien à l'état de pureté qu'à l'état d'alliages avec le cuivre, le zinc, l'étain, etc., et plus récemment avec le fer. Les termes de bronze d'aluminium sont maintenant couramment employés dans l'art des constructions mécaniques. Il est vrai que le métal pur n'est pas encore parvenu à y prendre pied, malgré son prix actuel qui ne représente plus que le 1/5 et même le 1/10 de ce qu'il était autrefois. On le voit, les changements dans l'industrie de l'aluminium se suivent avec une grande rapidité, parfois funeste pour ceux qui travaillent cette question. 550

Il y a deux ans à peine, on regardait comme impossible de préparer industriellement l'aluminium sans l'emploi du sodium métallique. Aussi, tous les inventeurs ont voué d'abord leurs plus grands soins à la préparation de ce métal qui n'était alors utilisé que dans les laboratoires. Grâce à ces recherches, on peut aujourd'hui s'en procurer facilement et à bon compte.

Mais, par une coïncidence curieuse, le sodium a été presque complètement abandonné dans la fabrication de l'aluminium.

560 Les nouveaux procédés de Cowles (pour la préparation des bronzes), de Héroult et de Hall (pour la préparation du métal et de ses alliages) ont démontré que la méthode électrolytique proposée autrefois par Bunsen était la plus avantageuse.

On nous annonce enfin d'Amérique que l'on serait parvenu à retirer l'aluminium de l'argile par une méthode si simple, que le prix actuel de 15 francs par kilo devrait baisser dans l'avenir jusqu'à 1 franc par kilo, soit en dessous du prix du cuivre. On fera bien de n'accueillir ces récits qu'avec les réserves les plus formelles. S'ils devaient se confirmer, il en résulterait des 570 conséquences incalculables pour la construction des appareils et machines de toute nature. Mais on nous a si souvent annoncé de pareils résultats qu'il convient d'avoir des preuves palpables pour que nous puissions y donner créance.

G. Lunge, *Revue Générale des Sciences.*

1891.

Les Équilibres Chimiques.

Première Partie : Mécanique Chimique ; Principes Expérimentaux.

La loi des proportions définies est la base d'une des branches de la Chimie, de celle qui s'est assurément le plus développée, parce qu'elle a trait à des phénomènes très apparents. On peut l'appeler l'architecture chimique, si l'on s'en tient au mode de représentation géométrique, connu sous le nom de théorie atomique. Les corps que l'on considère sont, ou des corps simples : hydrogène, oxygène, ou des composés définis : eau, acide carbonique ; dans tous les cas, des corps d'une composition chimique invariable. Dans la Chimie, considérée à ce 10 point de vue, on laisse de côté les phénomènes intermédiaires qui s'accomplissent quand un système chimique à un état déterminé, tel que le mélange gazeux d'hydrogène et d'oxygène, passe à un autre état déterminé, tel que l'eau.

Dans l'autre branche de la Chimie, *la mécanique chimique*, on étudie les états intermédiaires et les conditions dans lesquelles

la succession de ces états intermédiaires se réalise. On le fait au même point de vue qu'en physique, lorsqu'on étudie les changements d'état des corps, la vaporisation, la fusion, etc. Ces changements physiques et les changements chimiques sont, d'ailleurs, soumis aux mêmes lois, et l'on admet généralement 20 aujourd'hui qu'il n'y a pas lieu de scinder en deux sciences l'étude de ces deux ordres de changements. Nous donnerons donc à ces divers phénomènes la dénomination commune de phénomènes chimiques.

I.

L'étude de la mécanique chimique a été abordée pour la première fois en France par Berthollet dans ses recherches sur les lois des doubles décompositions salines, et elle a été la raison de sa lutte contre les exagérations de l'école de Proust. Mais Berthollet n'a été qu'un précurseur, et il était réservé à Henri Sainte-Claire-Deville, par sa découverte des lois de la dissocia- 30 tion, et par les conclusions qu'il en a tirées, de fonder définitivement cette nouvelle branche de la Chimie. A la suite de cette découverte, M. Peslin et M. Moustier ont les premiers, en France, rattaché les changements chimiques aux changements d'états étudiés par Sir William Thomson et Clausius. Puis, les Professeurs Gibbs en Amérique, et von Helmholtz, en Allemagne, ont appliqué d'une façon systématique aux phénomènes de la Chimie les lois de la Thermodynamique. Plus tard, Van't Hoff et l'un de nous ont formulé quelques corollaires de ces lois générales, corollaires plus directement applicables aux recherches 40 de laboratoire, et rétablissant ainsi le trait d'union qui doit exister entre la pratique et la théorie pour que l'une et l'autre puissent se prêter un mutuel secours.

La mécanique chimique n'est elle-même qu'une branche particulière d'une science plus générale, semblable par ses raisonnements à la mécanique rationnelle; c'est la science des déplacements et de la transformation de l'énergie. Mais laissant de côté ce point de vue un peu abstrait, nous nous attacherons spécialement, dans ce travail, aux résultats concrets, applicables spécialement à la Chimie. 50

Ces résultats n'ont pas seulement un intérêt théorique ; ils ont aussi une grande importance pratique. Dans bien des cas, notamment lorsqu'il s'agit des procédés industriels, les réactions ne s'accomplissent pas entièrement, parce qu'elles sont limitées par la présence de corps, qu'on ne peut évacuer immédiatement et directement ; dans d'autres cas, elles s'accomplissent avec une grande lenteur. Dans tous ces cas, les lois de la mécanique chimique trouvent une application directe. Dans le laboratoire, elles sont encore d'un utile secours, car elles permettent de
60 prévoir le sens des réactions qui doivent s'accomplir, et la nature des composés stables qui se forment dans des conditions données ; de plus, elles unifient des phénomènes, considérés trop souvent comme distincts ou nouveaux, et elles apportent ainsi une grande simplification dans la connaissance et la classification des réactions.

Le but de cette étude est de faire connaître aussi simplement que possible, mais sans rien sacrifier à la rigueur, les lois fondamentales nécessaires de la mécanique chimique, c'est-à-dire celles qui ne présentent rien d'empirique, soit qu'on puisse les
70 déduire de lois plus générales dont elles constituent une nouvelle vérification, soit que, spécialement applicables à la Chimie, elles aient pour critérium unique l'expérience directe. Ces lois présentent un caractère de certitude aussi grand que le comporte l'état actuel de nos connaissances scientifiques ; on ne saurait contester aujourd'hui leur exactitude sans révoquer en doute les lois fondamentales de la Thermodynamique.

On exposera les lois en question en écartant toutes les formules dont on a encombré sans nécessité la Thermodynamique et qui masquent si malheureusement le caractère
80 presque évident de la science créée par Sadi-Carnot sur une pure intuition.

II.

L'état sous lequel se présente un système chimique homogène ou non, se range nécessairement, au point de vue mécanique, dans l'une des trois classes suivantes :

État de repos chimique.

État d'équilibre chimique.

État de mouvement chimique.

L'état de mouvement chimique est bien connu des chimistes, c'est l'état d'un système dans lequel des transformations s'accomplissent spontanément. C'est par exemple l'état d'un 90 système composé d'une dissolution saline non saturée en présence d'un excès de sel, ou l'état d'un système composé d'eau et de vapeur d'eau non saturée, ou encore l'état d'un mélange gazeux d'hydrogène et d'oxygène porté subitement à une température élevée, capable de provoquer la combinaison.

La distinction entre l'équilibre et le repos est une notion relativement récente. Saisir cette distinction, c'est comprendre les principes fondamentaux sur lesquels repose tout l'édifice de la nouvelle science chimique. Aussi est-il nécessaire d'entrer dans des explications un peu détaillées, en faisant connaître 100 d'abord ce qu'est le repos, puis précisant cette notion par celle de l'équilibre.

Repos chimique.—Une première étude des conditions dans lesquelles s'accomplissent les changements chimiques semble révéler l'impossibilité de classer et de relier ces conditions. Les réactions peuvent être produites dans des circonstances les plus diverses : variation de pression, de température, d'état électrique ; rayonnement lumineux, calorifique, ou chimique ; chocs, frottements, et autres actions mécaniques, etc. Il n'est pas jusqu'aux phénomènes de la vie qui ne déterminent des transformations, et 110 les organismes les plus simples en apparence, tels que les ferments, ont cependant un effet chimique puissant.

Non seulement les causes des phénomènes chimiques sont variées ; mais leur effet est aussi variable, et, pour ainsi dire, contradictoire. Ainsi la chaleur qui détermine la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, agit aussi pour décomposer l'eau.

Ces complications, ces contradictions ne sont qu'apparentes et disparaissent si l'on a soin de distinguer les causes directes des changements chimiques, des causes indirectes ou occasionnelles. C'est une distinction que l'on comprendra mieux par un 120 exemple emprunté à la mécanique. Dans la manœuvre d'une sonnette à déclic, servant au battage d'un pieu, le déclenche-

ment du mouton de la sonnette rend possible le mouvement de cette masse, et la pesanteur agit pour produire ce mouvement. Le déclenchement et l'action de la pesanteur sont deux phénomènes qui comportent pareillement la mise en jeu de forces; mais les deux forces mises en jeu n'ont pas cependant la même relation avec le mouvement du mouton. La première rend les mouvements possibles, mais c'est la seconde qui doit être
130 regardée comme la cause déterminante. Aussi longtemps que la force qui fait marcher le déclic n'agit pas, le mouton est au repos. Il est au repos, non pas seulement parce qu'il ne se meut pas, mais encore parce qu'une augmentation de la force qui tend à produire sa chute n'entraînera aucun mouvement, tant que l'intensité de cette force ne sera pas suffisante pour rompre l'appareil d'enclenchement.

D'une manière générale le repos, en mécanique, est dû à ce que les forces actives, ou *puissances* qui peuvent produire le mouvement, sont inférieures aux forces passives, ou *résistances*
140 qui, sans produire le mouvement par elles-mêmes, le peuvent modifier. Ces résistances proviennent soit de liaisons, telles que celles réalisées par un déclic, soit du frottement, de la viscosité, etc.

Or cette distinction entre les puissances et les résistances trouve son application en chimie. Il y a souvent, dans les systèmes chimiques, des résistances ou liaisons intérieures dont la nature nous est inconnue, mais qui se révèlent par les obstacles qu'elles apportent aux transformations. C'est à cause de ces résistances que l'hydrogène, le carbone, et les matières organiques
150 ne se combinent pas à l'oxygène de l'air, aux basses températures, bien que l'état stable de ces systèmes, à ces températures, soit l'eau et l'acide carbonique.

La plupart des actions énumérées plus haut, variations de pression, de température, rayonnement, etc., ont pour effet de rompre les liaisons internes qui s'opposaient à toute transformation chimique. C'est ainsi qu'une élévation de température de 550°, ou que la présence de la mousse de platine, provoque la transformation en eau du mélange d'hydrogène et d'oxygène, que l'acide chlorhydrique se forme sous l'influence d'un rayon

solaire agissant sur le mélange de chlore et d'hydrogène, que les 160
ferments dédoublent le sucre en alcool et acide carbonique, que
la présence de l'acide carbonique provoque l'oxydation du fer par
l'oxygène de l'air, etc.

Dans tous ces cas, les actions qui se sont exercées sont suivies
de transformations chimiques et cependant elles ne sont pas ce
qu'on peut appeler la cause de ces transformations, car, après
avoir détruit les liaisons, elles cessent d'intervenir. L'état final
du système est indépendant de ces actions, et les énergies
qu'elles mettent en jeu n'ont pas de relations déterminées avec
les énergies déplacées par le changement chimique; elles sont, 170
le plus souvent même, négligeables vis-à-vis de celles-ci. C'est
ainsi que le travail nécessaire pour déclencher un mouton ou un
marteau pilon n'est en rien comparable à la force vive acquise
par la masse du mouton ou du marteau pilon.

Les résistances chimiques ne s'opposent pas toujours complètement aux transformations; elles ne font parfois que les
retarder et limiter la vitesse des réactions; celle-ci varie, en effet,
beaucoup suivant la nature des systèmes. Dans les composés
explosifs, la suppression des liaisons est brusque, et aucune
résistance n'intervient pour retarder la transformation qui 180
s'accomplit dans une durée extrêmement courte. D'autres fois,
le même système se transforme très rapidement à une température élevée, très lentement à basse température; l'éthérification,
qui s'accomplit en quelques heures à la température de 250°,
demande des années pour s'accomplir à la température ordinaire.

La notion de liaisons ou de résistances chimiques entraîne la
notion du repos chimique. Toutes les fois qu'un système
contient de telles liaisons, la transformation ne peut s'accomplir
si les facteurs qui la déterminent ne peuvent surmonter l'obstacle
créé par les liaisons. 190

III.

Dissociation.—Quand, sous l'influence de certains agents:
chaleurs, lumière, ferments, etc., les liaisons sont rompues, le
système sort du repos et prend un mouvement chimique. Mais
ce ne sont pas là les seuls agents qui aient un effet chimique;

nous avons fait connaître les résistances ; il nous faut maintenant
exposer ce que sont, dans l'état actuel de nos connaissances, les
puissances, c'est-à-dire les causes directes, immédiates des
phénomènes chimiques.

Quand il ne s'agit que de changements d'états, vaporisation de
200 l'eau, fusion de la glace, ces causes sont depuis longtemps
connues ; ce sont les variations de pression, de température et
d'état électrique. Or ce sont encore ces mêmes causes, et
seulement ces causes, qui interviennent dans les réactions
chimiques. Les expériences sur la dissociation ont simplement
permis d'étendre aux systèmes chimiques proprement dits les
lois des changements d'état ; ajoutons qu'elles n'en constituent
pas moins, dans l'ordre scientifique, une révolution comparable,
par son importance, à la découverte de la loi des proportions
définies.

210 La dissociation est un phénomène bien connu ; il n'est pas
inutile cependant d'en citer un exemple pour montrer quel en
est le véritable caractère et en faire ressortir les analogies.

Soit, comme exemple, la dissociation de l'iodure de mercure.
Supposons ce corps renfermé dans un récipient en verre dont le
volume puisse varier, au moyen d'un piston par exemple, la
pression étant maintenue constante. Si l'on élève la température
graduellement, le corps se volatilise, et la vapeur incolore ne
subit d'abord aucun changement chimique ; son volume aug-
mente conformément à la loi de dilatation des gaz, en même
220 temps que la chaleur absorbée suit une progression semblable.
Mais vers la température de 500°, la vapeur commence à se
colorer en violet, ce qui indique un commencement de décom-
position et la mise en liberté d'iode à l'état de vapeur. Si l'on
élève un peu plus la température, la proportion d'iodure
décomposé augmente, puis la composition chimique reste
stationnaire, tant que la température ne varie pas.

Si, au lieu d'élever la température, on l'abaisse, c'est au
contraire une combinaison d'iode et de mercure qui a lieu, et la
proportion d'iodure décomposé diminue. Aussi faible que soit
230 une variation de température, il y a toujours une certaine
quantité d'iodure décomposé ou reconstitué, quantité qui est

d'autant plus petite que la variation de température est plus faible et qui, autant que les mesures chimiques permettent de le constater, tend vers zéro quand la variation de température tend elle-même vers zéro.

Si au lieu de faire varier la température, on faisait varier la pression en laissant la température constante, on constaterait des faits analogues.

Ces traits généraux de la dissociation ne s'observent pas seulement dans les phénomènes de simple décomposition, mais 240 aussi dans des phénomènes plus complexes de substitution, de double décomposition, etc., comme le déplacement par le chlore du brome d'un bromure métallique, ou la réaction de la vapeur d'eau sur l'oxyde de carbone.

La dissociation nous montre donc que les vraies causes de la transformation chimique sont les variations de pression et de température. Du moins, ce sont avec les variations d'état électrique, les seules que nous connaissions. Tant que la pression, la température et la force électro-motrice restent constantes, un système chimique, même libre de toutes liaisons 250 intérieures, ne subira aucun changement. Mais dès que l'une de ces quantités varie, le système subit, en général, une transformation chimique, et la quantité de matière transformée dépend uniquement de la grandeur de la variation, quelles que soient les autres modifications des circonstances extérieures.

La *pression*, la *température* et la *force électro-motrice* sont donc trois facteurs ou causes des changements chimiques par dissociation, et, pour mieux marquer ce caractère commun, en même temps que pour simplifier le langage, nous les réunirons sous le nom de *Tensions*, en généralisant ainsi la signification 260 de ce mot, appliqué usuellement aux efforts de déformations élastiques par allongement.

Équilibre chimique—On peut, en résumé, exprimer comme il suit les lois de la dissociation :

1° L'état chimique d'un système est stationnaire quand les tensions extérieures : pression, température et force électromotrice, ne varient pas.

2° Il y a transformation chimique du système quand les

tensions, ou l'une d'elles, varient, même d'une quantité infiniment
270 petite.

Il est impossible de méconnaître, dans cet état stationnaire, un véritable cas d'équilibre d'une nouvelle espèce, mais comparable à un équilibre mécanique, thermique ou électrique. Ce n'est pas un cas de repos chimique, car lorsqu'il y a repos chimique, c'est une variation *finie* des tensions qui détermine une réaction chimique, tandis que dans la dissociation, la variation la plus faible de pression, de température ou de force électro-motrice est suffisante pour entraîner une modification chimique du système.

280 La notion d'équilibre chimique est ainsi la conséquence directe des faits de dissociation.

Réversibilité chimique—La dissociation est un phénomène *réversible*. L'expérience montre en effet que quand, après avoir fait varier une des tensions ou toutes les tensions, on les ramène à leurs valeurs primitives, le système reprend le même état chimique. Quand après avoir passé d'un état quelconque à un état différent, par voie de dissociation, un système repasse en sens inverse par les états intermédiaires, les tensions qui satisfont à l'équilibre reprennent leurs valeurs primitives.

290 Cette existence de la réversibilité dans les équilibres chimiques est indispensable pour qu'on puisse leur appliquer certaines des lois de la thermodynamique.

IV.

Mouvement et déplacements chimiques.—On peut maintenant, grâce à la distinction qui vient d'être établie entre le repos et l'équilibre, faire une classification rationnelle des modifications de toute nature qui s'accomplissent dans un système.

1° *Changement physique.*—Ce système peut subir des modifications d'ordre purement physique (mécaniques, thermiques ou électriques), sans cesser d'être en état de repos chimique; il
300 suffit pour cela que le système contienne des liaisons ou des résistances intérieures capables de s'opposer aux transformations chimiques. C'est ainsi qu'un mélange d'oxygène et d'acide

chlorhydrique peut être comprimé, échauffé sans devenir le siège d'aucune réaction chimique. En général, la transformation chimique s'accomplit plus lentement que les changements mécaniques et thermiques, et quand les variations des tensions extérieures sont suffisamment rapides, le système peut être considéré, dans cet intervalle de temps, comme restant au repos chimique.

Dans ces changements, le système passe d'un état de repos à 310 un autre état de repos, identique au point de vue chimique. Ces changements peuvent d'ailleurs être réversibles ou non suivant qu'il y a ou non équilibre entre les tensions du système et les tensions extérieures.

2° *Mouvement chimique.*—Le même système à l'état de repos, c'est-à-dire hors d'équilibre chimique, pourra, s'il est abandonné à lui-même après qu'on a supprimé les liaisons qui s'opposent aux transformations, éprouver des modifications chimiques spontanées, phénomène qui n'est jamais réversible, puisqu'il ne consiste pas dans une succession d'états d'équilibre. Dans ce 320 cas, le corps part d'un état de repos, pour se rapprocher d'un état d'équilibre. Ainsi le mélange d'oxygène et d'acide chlorhydrique, qui, chauffé à la température de 400°, reste à l'état de repos, entrera en réaction au contact d'une petite quantité d'oxyde de cuivre qui suffit pour annuler l'action des liaisons internes (procédé Deacon pour la fabrication du chlore) ; il se produit alors du chlore et de la vapeur d'eau.

Le retour d'un système à l'état d'équilibre par voie irréversible peut se faire dans des conditions différentes au point de vue des circonstances extérieures. Les deux cas les plus importants à 330 considérer sont celui où le système chimique est *isolé*, et où la transformation chimique s'effectue à volume invariable et sans échange de chaleur avec l'intérieur (combinaison de $H+O$ en vase clos), et celui où le système est maintenu sous *Tensions fixes* : c'est-à-dire où la transformation chimique s'accomplit sans que la pression, la température et la force électro-motrice extérieures varient. C'est le cas de la plupart des réactions effectuées dans nos laboratoires.

Les quantités de chaleur et de travail dégagées ou absorbées

340 par le fait de la réaction chimique dans une transformation s'effectuant à Tensions fixes sont appelées *chaleur latente*, *travail latent* à Tensions fixes. C'est cette chaleur latente que l'on mesure dans les opérations calorimétriques qui s'effectuent presque toujours à Tensions fixes.

3° *Dissociation.*—Un système chimique sans liaisons intérieures ou dont les liaisons ont été rompues par un artifice convenable (action de présence, action de la lumière, etc.), et qui est par suite à l'état d'équilibre chimique, peut éprouver des modifications réversibles à la fois d'ordre physique et chimique.
350 Ce sont en fait les changements subis dans la dissociation (dissociation de l'iodure de mercure du carbonate de chaux, dissolution des sels, vaporisation de l'eau). Dans ce cas, l'état chimique du système varie avec son état mécanique, thermique et électrique.

Systèmes à tensions fixes de dissociation.—L'équilibre chimique peut être stable, et alors si l'une des tensions varie infiniment peu, le coefficient de dissociation varie d'une quantité infiniment petite, et sa valeur est entièrement déterminée pour des valeurs déterminées des Tensions d'équilibre; c'est le cas de la dissocia-
360 tion de l'iodure de mercure, de l'acide iodhydrique, etc. Il n'y a pas de cas d'équilibres chimiques instables; mais il y a des équilibres chimiques indifférents; toute variation d'une Tension entraîne alors la transformation chimique d'une masse *finie* du système, et le coefficient de dissociation peut varier, sans que les Tensions d'équilibre varient. De plus ces variations ont pour limite même, les états limites du système. C'est là la dissociation à Tensions fixes, où l'on peut faire passer le système d'un état chimique défini à l'état opposé, sans faire varier les tensions d'équilibre. Ainsi, l'eau peut être vaporisée complètement, par
370 exemple à 100° et sous la pression 760^{mm}, et le carbonate de chaux peut être décomposé totalement dans les mêmes conditions de fixité des tensions, à la température de 812° et sous la pression 760^{mm}.

Dans ces systèmes à tensions fixes de dissociation, on observe, et c'est là ce qui constitue la loi des Tensions fixes, que les éléments libres homogènes qui composent les états intermédiaires

du système (eau et vapeur dans le premier exemple cité; sel, acide et base dans le second exemple) conservent un état et une composition invariables, quel que soit le degré de dissociation. Mais toutes les fois que la transformation chimique a pour effet 380 de faire varier l'état chimique des constituants homogènes du système, soit en créant ou supprimant des composés définis, soit en diminuant ou augmentant le titre des mélanges, soit en modifiant l'état d'agrégation des éléments (condensation, cristallisation, etc.) l'expérience a fait reconnaître que les tensions d'équilibre varient avec le degré de dissociation. C'est le cas des *systèmes* totalement homogènes, tels que celui formé par la dissociation de la vapeur d'iodure de mercure, ou de *systèmes* formés de la juxtaposition d'éléments homogènes dont la composition peut varier. Tel est le cas de la dissociation du 390 carbonate de baryte; en effet le carbonate de baryte, sel fusible, dissout la baryte, en sorte que le système comprend un mélange dont le titre varie avec le degré de dissociation. De même une dissolution saline non saturée, dont la concentration est variable, aura à température fixe une tension de vapeur variable avec cette concentration.

L'existence des tensions fixes de dissociation n'a donc lieu que dans des cas particuliers d'équilibre chimique et n'a pas la généralité qu'on lui a souvent attribuée. Mais l'étude des systèmes à tensions fixes présente un grand intérêt, parce que, 400 d'une part, tout système à tensions variables peut être considéré comme un système à tensions fixes, s'il s'agit d'un changement chimique infiniment faible, et que, d'autre part, les lois numériques des systèmes à tensions fixes sont les plus simples et les données numériques qui s'y rapportent, les plus faciles à recueillir. En outre, cette loi des tensions fixes formulée par M. Debray a été le point de départ de la majeure partie des recherches relatives à la dissociation qui ont été effectuées par les élèves de H. Sainte-Claire-Deville.

Du caractère de la dissociation à tensions fixes résulte cette 410 conséquence que tout élément libre homogène engagé dans un système en équilibre n'intervient pas par sa masse. On peut, dans le système, ajouter une certaine masse de cet élément, ou

en enlever sans troubler l'équilibre; on peut faire varier, par exemple, la quantité de sel au contact d'une solution saturée, la quantité de chaux au contact du carbonate de chaux dissocié. Tandis qu'en mécanique la masse intervient dans l'équilibre, et est un facteur de la force mécanique, en chimie la masse est sans influence, et la force chimique d'un corps, c'est-à-dire sa
420 capacité de réaliser un état d'équilibre, ne dépend pas de sa masse.

Dans les systèmes à tensions variables, dans les systèmes homogènes par exemple, toute variation dans les proportions de l'un des corps engagé dans un mélange détruit l'équilibre; en sorte que la densité apparente du corps (c'est-à-dire la densité du corps supposé occuper le volume total du mélange), est un facteur interne de l'équilibre; c'est ce que l'on appelle l'*action de masse*, expression impropre puisque la masse absolue du corps est sans influence sur l'équilibre.

Les Équilibres Chimiques.

Deuxième Partie : Application des Principes de la Thermodynamique.

Dans un précédent article nous avons exposé les principes fondamentaux spéciaux à la mécanique chimique. Il faut maintenant combiner ces principes spéciaux avec les principes généraux de la thermodynamique pour en tirer les lois applicables directement aux transformations et aux équilibres chimiques.

Les principes de la thermodynamique sont assez connus pour qu'il soit suffisant de les rappeler sommairement.

Les deux premiers principes, celui de Joule et celui de Carnot,
10 s'expriment simultanément par la relation

$$du = tds - pdv$$

où du, ds, dv, sont les variations d'énergie intérieure, d'entropie

et de volume dans une transformation réversible quelconque, à la température absolue t, et sous la pression p.

Pour simplifier, nous ne considérerons que des systèmes où les variations de quantité d'électricité et de vitesse sont nulles.

Le troisième principe de la thermodynamique est le principe de Clausius ; ce principe a reçu des énoncés différents qui ne sont pas toujours suffisamment précis ; il doit être formulé comme suit : 20

Toute transformation spontanée d'un système hors d'équilibre et isolé, c'est-à-dire dont le volume ne varie pas, et qui ne peut emprunter ni abandonner de chaleur à l'extérieur, est accompagnée d'un accroissement d'entropie.

Le principe de Clausius n'a d'autre critérium que l'expérience ; il ne se peut déduire des principes de Joule et de Carnot. Il représente en thermodynamique la première loi du mouvement de Newton, car l'entropie joue ici le même rôle que la vitesse en mécanique. Ce principe forme la base de toute la mécanique chimique, et l'on peut en déduire presque immédiatement la loi 30 du mouvement chimique.

Lois du mouvement et de l'équilibre chimique.—Pour faire usage des lois fondamentales de la thermodynamique, il convient de faire intervenir une notion spéciale, celle de l'*énergie utilisable*, qui a le grand avantage de donner à ces principes une forme en quelque sorte tangible sans modifier en rien la rigueur des raisonnements. Avant de définir exactement cette nouvelle grandeur et celles qui s'y rattachent, on en donnera une idée générale en s'aidant d'exemples familiers.

Toute l'énergie dont nous pouvons disposer dans la Nature et 40 que nous pouvons utiliser à notre gré sous forme de travail mécanique ou d'électricité nous est fournie directement ou indirectement par des corps primitivement hors d'équilibre pendant qu'ils reviennent à leur position d'équilibre ou simplement s'en rapprochent. Ainsi l'eau qui tombe des montagnes pour se rendre à la mer, la vapeur qui se refroidit de la température de la chaudière à la température du condenseur, sont les sources principales de travail dont nous disposons. Les systèmes chimiques hors d'équilibre peuvent aussi remplir le même

50 office : tel est l'explosif qui lance le projectile dans le canon, ou le charbon qui par sa combustion échauffe l'eau de la chaudière à vapeur. Tout système hors d'équilibre est un réservoir de travail disponible ; c'est là une loi expérimentale très générale dont le principe de Clausius n'est que l'application aux phénomènes thermiques.

Ceci dit, passons à l'exposé rigoureux de la question, et rappelons tout d'abord que, pour simplifier, nous n'envisageons que les phénomènes qui ne comportent pas de variations sensibles de vitesses des systèmes ou des éléments des systèmes
60 considérés, comme nous faisons abstraction des changements électriques, magnétiques et de capillarité.

De même que le mouvement en général se ramène à celui qui a lieu sous des forces constantes, de même toute transformation chimique peut se ramener à celle qui se produit sous tensions fixes. Mais un système chimique qui se transforme sous tensions fixes n'est pas un système isolé, et, pour appliquer le principe de Clausius, il faut tenir compte du système extérieur qui exerce les tensions fixes, et dont le volume, l'entropie et l'énergie peuvent varier quand le système chimique subit une transformation.
70 Ce système, que l'on appellera *le milieu*, peut être d'ailleurs quelconque, et les raisonnements et résultats qui vont suivre sont indépendants de sa nature particulière.

Si donc l'on suppose un système chimique hors d'équilibre, abandonné à lui-même dans un milieu à tensions fixes, l'ensemble constitue un système isolé auquel s'applique le principe de Clausius, c'est-à-dire que la transformation chimique qui s'accomplira sera celle qui répond à une augmentation de l'entropie totale du système et du milieu.

Reste à évaluer cette augmentation ou plutôt une certaine
80 énergie qui s'y trouve liée et qui est précisément l'énergie utilisable, comme on va le voir.

Afin de mieux faire saisir l'enchaînement des idées et l'esprit de la démonstration, reportons-nous d'abord à un cas simple et bien connu de la mécanique.

Quand un corps en mouvement se rapproche de la position d'équilibre stable, il y a, conformément à la première loi du

mouvement de Newton, accroissement de sa vitesse, et par suite, augmentation de sa force vive. Si, au lieu de laisser le mouvement s'accomplir spontanément, on intervient pour rétablir l'équilibre, le corps accomplit un certain travail positif et son énergie initiale se trouve diminuée d'une égale quantité; le théorème des forces vives ou, si l'on veut, le principe de la conservation de l'énergie, nous apprend d'ailleurs que la quantité de travail mis en liberté, *dans ce déplacement réversible*, c'est-à-dire sans variation de vitesse, est égale à l'augmentation de force vive qui a lieu dans le mouvement spontané.

Dans la thermodynamique ou la mécanique chimique, le raisonnement reste sensiblement le même; il suffit de substituer à la vitesse et à la force vive les notions thermiques équivalentes, entropie et quantité de chaleur. Et si l'on se restreint par exemple au cas de la transformation chimique, on doit, au lieu de comparer des changements de position dans l'espace, comparer des changements d'état chimique.

Répétons donc le raisonnement précédent, avec ces notions différentes. Nous avons vu que quand le système passe spontanément d'un état chimique A à un autre état chimique B, l'entropie augmente; d'ailleurs, puisque le système et le milieu forment un ensemble isolé, l'énergie totale ne varie pas.

Mais on peut aussi faire subir à cet ensemble une transformation réversible qui amène le système chimique au même état final que par la transformation spontanée, sans qu'il en soit nécessairement, au reste, de même du milieu. En outre, de même qu'on peut faire passer le mobile de sa position initiale à sa position finale sans changement de vitesse, on peut, dans l'opération réversible accomplie sur le système et le milieu tout entiers, faire en sorte que l'entropie *totale* de l'ensemble ne varie pas.

Or l'état final de l'ensemble après la transformation à énergie constante, et l'état final après la transformation à entropie constante ne diffèrent que par l'entropie du milieu, puisque l'état final B du système est le même dans les deux cas. Mais on vient de voir que l'entropie totale du système et du milieu est plus grande dans le premier cas que dans le second; par suite

l'entropie du milieu sera plus grande après la transformation spontanée qu'après la transformation réversible, et pour ramener, dans le premier cas, l'entropie à sa valeur primitive, c'est-à-dire pour revenir à l'état final de la transformation réversible, il faudra enlever au milieu une certaine quantité de chaleur, ce qui diminue d'autant l'énergie initiale. Ainsi donc le principe
130 de Clausius, uni à celui de la conservation de l'énergie, conduit à cette conséquence que *dans la transformation à entropie constante l'énergie de l'ensemble a diminué* et que cette diminution d'énergie est égale à la quantité d'énergie correspondant à l'accroissement d'entropie totale, dans la transformation chimique. Cette conclusion n'est pas autre chose, en thermodynamique, que le théorème correspondant à celui des forces vives; on voit aussi que cette transformation réversible à entropie totale constante est en thermodynamique l'équivalent du mouvement uniforme en mécanique. Puisque l'énergie,
140 dans la transformation à entropie constante a diminué, c'est qu'une certaine partie de l'énergie initiale a été déplacée à l'extérieur, et il est facile de voir que cette énergie déplacée est précisément l'énergie utilisable qu'une machine théorique parfaite mettrait en liberté sous forme de travail.

En effet, pour extraire du système hors d'équilibre toute l'énergie susceptible de passer à l'extérieur, il faut évidemment procéder par voie réversible, sinon une certaine partie de l'énergie serait transformée en force vive, ou déplacée sous forme de chaleur, l'une et l'autre inutilisées; mais il faut de
150 plus que l'agent extérieur, ou machine, qui intervient pour assurer la réversibilité, n'absorbe aucune part de l'énergie, et revienne par conséquent à son état initial, car il ne sert que d'intermédiaire, et il doit être utilisé indéfiniment. Il est donc nécessaire que les échanges de chaleur effectués par cet agent entre le système et le milieu, pour maintenir l'équilibre thermique, se fassent par des cycles fermés, qui sont des cycles de Carnot; d'où il suit que les variations d'entropie du système et du milieu sont égales et de signes contraires, c'est-à-dire que l'entropie totale reste constante. Ainsi donc l'énergie mise
160 en liberté par une telle machine, c'est-à-dire l'énergie utilisable

est bien celle qui répond à une transformation à entropie constante. De la même manière, quand on utilise la force d'une chute d'eau par exemple, la vitesse de l'appareil doit être constante, et égale à la vitesse initiale.

On appelle *énergie potentielle*, ou simplement *potentiel* du système chimique, cette part de l'énergie totale qui varie dans la transformation réversible à entropie constante, et qui est, en mécanique, l'énergie de position. L'énergie utilisable est donc la variation de l'énergie potentielle, et le principe que nous venons d'établir peut s'énoncer en disant que dans toute 170 transformation qui tend vers l'état d'équilibre stable, l'énergie potentielle diminue, et la diminution est compensée par une augmentation d'entropie (énergie actuelle) si la transformation est spontanée, par une énergie utilisable ou travail mis en liberté, si elle est réversible.

Quant à la valeur π du potentiel, elle s'exprime simplement en fonction de l'état du système chimique. Ce potentiel est en effet, par définition, la somme de l'énergie intérieure u du système chimique, et de l'énergie intérieure u_0 du milieu dans le changement réversible; mais puisque le milieu conserve 180 toujours les mêmes tensions t_0 et p_0, l'énergie u_0 varie proportionnellement aux variations de volume et d'entropie du milieu, et par suite aux variations de volume v et d'entropie s du système prises en signe contraire, car les unes et les autres sont égales en valeur absolue. On a donc :

$$u_0 = -(st - vp)$$

et par conséquent :

$$\pi = u - st + vp$$

C'est la fonction H' de M. Massieu, appliquée à la transformation chimique sous tensions fixes. 190

Grâce à cette notion du potentiel, le principe de Clausius peut s'exprimer simplement en disant que dans une *transformation* spontanée d'un système chimique dans un milieu à tensions fixes, le potentiel du système diminue. Il devient minimum quand l'équilibre stable est atteint, car, par définition, le système écarté de sa position d'équilibre stable y revient spontanément;

dans le cas d'équilibre instable, le potentiel serait maximum ; il est constant si l'équilibre est indifférent.

On peut donc énoncer les lois suivantes sur l'équilibre et le
200 mouvement :

Critérium d'équilibre.—*Pour qu'un système chimique soit en équilibre, il faut et il suffit que l'on ait* :

$$du = tds - pdv$$

pour toute transformation quelconque infiniment petite du système.

L'énergie utilisable est, dans ce cas, un infiniment petit du second ordre, négatif, si l'équilibre est instable, positif, s'il est stable. Dans l'équilibre indifférent, cette quantité est du troisième ordre, ou bien nulle.

Loi du mouvement chimique.—*Quand un système chimique*
210 *est hors d'équilibre, la transformation chimique qui s'accomplira, sans l'intervention d'énergie étrangère, à pression et température extérieures constantes, sera celle pour laquelle on a :*

$$du - tds + pdv < 0$$

c'est-à-dire que l'énergie utilisable est positive.

On peut déduire de ces expressions une formule intéressante parce qu'elle comprend la chaleur latente de réaction rapportée à l'unité de masse. Le principe de Joule nous fournit en effet la relation :

$$\mathrm{L}dm = du + pdv$$

220 dm étant la masse transformée, Ldm la chaleur *absorbée.* On peut donc écrire :

$$d\pi = \mathrm{L}dm - tds$$

quantité qui n'est pas nulle, quand le système est hors d'équilibre.

A l'état d'équilibre, car $d\pi$ est nul, on a :

$$\mathrm{L} = \frac{tds}{dm}$$

formule qui montre que la chaleur latente est proportionnelle, dans ce cas, à la variation d'entropie.

II

Énergie chimique.—L'énergie utilisable d'une transformation infiniment petite d'un système à l'état d'équilibre a une expres- 230 sion simple. Soit un système à l'état d'équilibre chimique sous les tensions p et t du milieu. Faisons varier sa composition chimique, c'est-à-dire son degré de dissociation, d'une quantité dm; l'énergie utilisable du système écarté ainsi de sa position d'équilibre, dans le milieu à tensions p et t, a pour valeur :

$$du - tds + pdv$$

du, ds et dv, étant les variations correspondant à un changement de composition chimique du système *passant de la position d'équilibre à la position hors d'équilibre.*

Si maintenant le système, pris dans sont état initial est placé 240 dans un milieu dont les tensions $p+dp$, $t+dt$, sont égales aux tensions d'équilibre de l'état final, son énergie utilisable est égale à

$$- du + (t + dt)ds - (p + dp)dv.$$

Or ces deux énergies utilisables sont égales à un infiniment petit du second ordre, et par suite chacune est égale à la demi-somme des deux quantités précédentes, c'est-à-dire que l'énergie utilisable du système quand il est à un état infiniment voisin de l'état d'équilibre, a pour expression :

$$\epsilon = \tfrac{1}{2}(dt.ds - dp.dv) \qquad 250$$

Dans cette formule dt et dp sont les variations des tensions de dissociation, et ds et dv sont les variations de volumes et d'entropie uniquement dues à la transformation chimique à tensions fixes; toutes ces variations étant mésurées dans le sens suivant lequel on s'éloigne de la position d'équilibre.

Puisque la quantité ϵ est l'énergie utilisable du système amené à l'état hors d'équilibre chimique, c'est une quantité toujours positive si l'équilibre est stable. Dans ce cas, on peut donc écrire la relation suivante :

$$ds.dt - dv.dp > 0. \qquad 260$$

On peut mettre encore cette formule de dissociation sous

une autre forme, plus directement applicable aux recherches chimiques. Désignons par L la chaleur latente *dégagée* et par N le travail *accompli* dans la transformation chimique qui s'effectue sous les tensions extérieures fixes p et t, quand les Tensions initiales du système sont $p+dp$ et $t+dt$.

On a

$$Ldm = tds \text{ (voir précédemment)}$$
$$N = -pdv$$

270 et par suite l'*énergie chimique latente*, pour une variation de tensions dt, dp, a pour expression :

$$\frac{\epsilon}{dm} = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{t}dt + \frac{N}{p}dp\right)$$

quantité toujours positive, en sorte que la relation devient :

$$\frac{Ldt}{t} + \frac{Ndp}{p} > 0$$

Loi sur le sens des réactions réversibles.—Les données de la thermochimie font connaître les quantités de chaleur et de travail mises en jeu dans une transformation chimique s'accomplissant dans un sens déterminé, et les signes de ces quantités. Si d'autre part on se donne les variations dp et dt des tensions 280 on voit que la formule

$$L\frac{dt}{t} + N\frac{dp}{p} > 0$$

permet de déterminer le signe des quantités L et N et par suite le sens de la transformation chimique qui s'accomplit sous l'action d'une variation donnée des tensions.

Quand une seule des tensions varie, on peut énoncer sous une forme très simple la loi sur le sens des transformations. Si en effet dans la formule ci-dessus on fait $dp=0$, ou $dt=0$, on obtient les relations suivantes :

$$Ldt > 0 \quad \text{ou} \quad Ndp > 0$$

290 c'est-à-dire que les signes de L et de N sont respectivement les mêmes que ceux de dp et de dt. On peut donc énoncer la loi suivante :

Quand un système chimique est en équilibre, si l'on augmente

l'une des tensions, l'autre restant constante, la réaction chimique qui s'accomplit est celle qui se fait avec une absorption d'énergie latente de même espèce que celle de la tension qui a varié. Si cette énergie latente est nulle, la variation de tension est sans influence sur l'état chimique du système.

C'est ainsi qu'une augmentation de pression entraîne la réaction qui répond à une diminution de volume (fusion de 300 la glace, transformation de l'iodure d'argent, dissolution du chlorure de sodium, précipitation du chlorhydrate d'ammoniaque, etc.);—qu'une élévation de température provoque une transformation avec absorption de chaleur (vaporisation, décomposition du carbonate de chaux, dissolution de l'hydrate de baryte, précipitation de l'hydrate de chaux, etc.).

Quand la chaleur latente est nulle, une variation de température ne trouble pas l'équilibre (dissolution de sulfate de chaux hydraté, vers 35°), et quand la transformation chimique s'accomplit sans changement de volume, l'état d'équilibre n'est pas 310 modifié par une variation de pression (combinaison de l'iode et de l'hydrogène).

La loi de Lenz, l'effet Peltier sont des exemples d'application de cette loi dans le domaine de l'électricité.

Loi d'isodissociation.—En général, des variations simultanées de pression et de température modifient l'état chimique d'un système en équilibre. Mais si ces variations ont entre elles un certain rapport, l'état chimique reste invariable. Il y a ce que l'on peut appeler isodissociation; le système chimique, sans qu'aucune liaison intérieure s'oppose à la transformation chimi- 320 que, se comporte cependant comme un système au repos.

Dans ce cas, l'énergie utilisable de transformation chimique est nulle et l'on a par conséquent la relation

$$L\frac{dt}{t} + N\frac{dp}{p} = 0$$

Cette formule d'isodissociation fait connaître la direction d'isodissociation, c'est-à-dire le rapport qui doit exister entre les variations de température et de pression, pour que le système conserve toujours le même étaf chimique.

Cette formule, établie d'abord pour les phénomènes de
330 vaporisation, avait été étendue ensuite à la dissociation des systèmes à tensions fixes. On voit, comme l'un de nous l'avait déjà montré, qu'elle est absolument générale et applicable aux systèmes homogènes ; elle subsiste, d'ailleurs, même dans le cas où l'équilibre serait instable.

La formule d'isodissociation trouve des applications pratiques dans le calcul des variations des points de transformation des corps (fusion de la glace, transformation de l'iodure d'argent, etc.)

III.

Les lois sur le mouvement chimique et sur la dissociation ont
340 trait uniquement aux relations qui lient les tensions extérieures à l'état du système chimique considéré comme un tout. Mais un système chimique est un tout complexe, soit qu'on le considère comme formé par des éléments homogènes distincts, s'il est hétérogène,—soit, s'il est homogène, qu'on le considère comme constitué par des composés chimiques, engagés dans le mélange. Et il convient de rechercher les relations qui existent entre l'état des éléments constituants lorsque l'équilibre est établi, c'est-à-dire de définir les conditions d'équilibre intérieur.

350 On doit étudier d'abord l'équilibre des systèmes à tensions fixes, puis l'équilibre des systèmes homogènes, ceux-ci pouvant être ramenés à ceux-là.

Systèmes à tensions fixes.—Dans les systèmes à tensions fixes, l'état chimique de chaque élément libre homogène du système reste invariable, quelles que soient les modifications chimiques subies par le système. Or il est aisé de voir que si l'on convient de définir l'énergie et l'entropie d'un système de masse variable, mais à un état physique et chimique invariable, comme proportionnelles à la masse—, l'énergie, l'entropie, et par suite le
360 potentiel d'un système à tensions fixes sont respectivement égaux à la somme des énergies, entropies et potentiels de ses éléments. Il suffit, pour qu'il en soit ainsi, que toutes ces quantités soient rapportées à un même état initial d'équilibre

du système. Cette conclusion s'établit facilement quand l'état chimique du système varie sans que ses tensions varient, et aussi quand les tensions varient sans que l'état chimique soit modifié ; par suite elle est vraie pour une transformation réversible quelconque. Or, dans un système du genre de ceux que nous considérons, une transformation chimique réversible à tensions fixes s'accomplit sans variation de potentiel. Donc, 370
si les états limites sont des composés définis, le potentiel de chaque composé est le même. D'où cette loi que :

La condition nécessaire et suffisante d'équilibre intérieur d'un système à tensions fixes est que les potentiels des états opposés du système, rapportés à des masses égales, soient égaux.

Ainsi les potentiels de deux états différentes d'une substance à son point de transformation, sont égaux, si l'on a soin de mesurer les entropies et l'énergie comme il vient d'être dit.

On tire de là le corollaire connu sous le nom de **Loi du point triple** : *lorsque deux corps ou systèmes chimiques font équilibre à* 380 *un troisième système, ils se font équilibre entre eux.*

C'est ainsi que l'eau et la glace, à la température où leurs tensions de vapeurs sont égales, sont respectivement à leur point de fusion et de congélation, et les trois points de transformation se confondent en un seul, qui est le point triple. Pour l'eau, la température du point triple est très voisine de zéro. Dans les dissolutions salines, où le changement de volume dû à la dissolution est peu considérable, le point triple est aussi voisin du point de transformation.

Systèmes homogènes.—Pour appliquer la condition générale 390 d'équilibre de minimum du potentiel aux systèmes homogènes de composition variable, il faut tenir compte des éléments engagés dans le mélange, et établir la relation qui doit exister entre la composition du système à l'état d'équilibre, et la valeur de son potentiel.

Or il est toujours possible de concevoir qu'on puisse passer *par voie réversible* d'un état initial homogène A à un état final hétérogène B qui ne diffère de l'état initial, qu'en ce qu'une masse infiniment petite *dm*, de l'un des éléments, a été isolée du système homogène. Pratiquement, cette transformation 400

réversible peut s'accomplir par osmose, liquéfaction, cristallisation; il est facile ensuite d'imaginer des liaisons s'opposant au mélange de la masse séparée *dm* ou même simplement de l'isoler complètement du système B'

Il est évidemment possible, dans ce cas, de donner à la masse *dm* des tensions *t* et *p*, telles que le potentiel de l'ensemble hétérogène formé du système B' pris sous les mêmes tensions que le système A, et de cette masse *dm*, soit égal au potentiel du système A. Rien ne s'oppose alors à ce qu'on définisse
410 l'état de l'élément engagé dans le système homogène par l'état de la masse infiniment petite isolée, satisfaisant à cette condition. De cette manière, le potentiel total n'a pas varié dans la transformation réversible, et le potentiel de l'élément engagé dans le mélange, potentiel rapporté à l'unité de masse, est égal à celui du système. Grâce à ces conventions, les transformations infiniment petites d'un système homogène sont soumises à la même loi que celles des systèmes à tensions fixes, et cette loi peut s'appliquer dès que l'expérience a permis de mesurer les tensions *t* et *p*, qui caractérisent l'état de l'élément considéré.

420 Il est d'ailleurs à remarquer que la condition qu'on s'est imposée ne suffit pas pour définir complètement ces tensions, et qu'il faut y ajouter une autre condition. Du choix de cette condition dépend la simplicité des formulés et des lois.

Loi de l'action de masse.—Si, par exemple, l'on admet que la température de la masse isolée reste la même que celle du système homogène, on a pour la condition d'équilibre, en procédant comme on l'a déjà fait pour établir la formule d'isodissociation, la relation :

$$L\frac{dt}{T} + \sum(v_1 - v_2)dp = 0$$

430 où L est la chaleur latente de réaction à tensions fixes correspondant à un changement chimique *dm*; —$(v_1$-$v_2)$ les changements de volumes de chaque corps isolé, mesurés sous des tensions individuelles *p* et *t*, qui résultent du changement chimique *dm*,—*dp* les variations de pression qu'il faut faire subir à chaque corps isolé pour maintenir l'égalité du potentiel

du système des corps isolés et du mélange quand la pression ou la composition de ces derniers varie.

Cette formule, établie dans le cas où la masse des éléments en présence est invariable et où leur état de combinaison seul varie, est encore exacte pour le cas où la masse des éléments varie ; cela résulte de ce que l'on peut, après avoir isolé du mélange un certain nombre de corps, faire varier leur masse sans troubler l'état d'équilibre du système total. 440

Dans les cas particuliers des mélanges de gaz parfaits, on verrait aisément que les pressions à attribuer à chaque gaz composant sont celles qu'ils auraient s'ils occupaient le volume total du mélange.

En attribuant cette valeur à la pression, on trouve pour la condition d'équilibre des systèmes formés de gaz parfaits, la relation : 450

$$L\frac{dt}{t}+N\frac{dp}{p}+Rt\sum n\frac{dc}{c}=0$$

dans laquelle R est la constante des lois de Mariotte et de Gay-Lussac déterminée par la formule :

$$pv=Rt$$

et rapportée à une molécule du gaz.

n, le nombre de molécules de chacun des gaz qui apparaît ou disparaît par le fait de la réaction dégageant les énergies latentes L et N.

c, le rapport du volume de chaque gaz au volume total du mélange, volumes mesurés l'un et l'autre sous les mêmes tensions. 460

Loi du point triple.—La possibilité d'isoler ainsi les divers éléments d'un mélange par voie réversible, permet également d'étendre à ce système la condition d'égalité des potentiels des états opposés d'un système en équilibre, et par suite la loi du point triple, déjà établie pour les systèmes à tensions fixes.

Cette loi du point triple, étendue aux systèmes homogènes, comporte des applications pratiques nombreuses et importantes. Par exemple, dans un système complexe formé de vapeur d'eau, acide carbonique, hydrogène et oxyde de carbone, la condition 470

d'équilibre pourra être déduite des lois de la dissociation de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau, pris isolément.

IV.

Résumant les applications des principes de la Thermodynamique, on peut énoncer les lois générales suivantes, qui régissent les transformations dès systèmes chimiques quelconques :

1. La transformation chimique qui s'accomplit à tensions fixes, sans l'intervention d'énergies étrangères autres que celles échangées avec le milieu, est celle qui répond à une diminution
480 de potentiel, quantité exprimée par la formule

$$\pi = u - st + vp$$

où u, s, et v, sont l'énergie intérieure, l'entropie et le volume du système, t et p la température et la pression du milieu.

2. Pour qu'un système chimique soit en équilibre, il faut et il suffit que le potentiel soit minimum, maximum ou constant.

3. Quand les tensions de dissociation varient de dp et dt, la transformation qui s'accomplit est celle pour laquelle l'énergie utilisable chimique est positive, c'est-à-dire celle pour laquelle on a la relation :

490 $$L\frac{dt}{t} + N\frac{dp}{p} > 0$$

où L et N sont les énergies de transformation chimique, chaleur latente et travail, p et t les tensions.

En particulier : si la pression seule augmente, la température restant constante, la transformation chimique qui s'accomplit est celle qui comporte une contraction de volume ;—si la température augmente, la pression restant constante, la transformation chimique est celle qui se fait avec absorption de chaleur ;—si la chaleur latente est nulle (ou si la réaction se fait sans changement de volume), une variation de température (ou une variation
500 de pression) est sans action sur l'état chimique du système.

4. Pour qu'il y ait isodissociation, c'est-à-dire pour que les variations simultanées des tensions de dissociation ne puissent

pas modifier l'état chimique du système supposé libre de toute liaison, il faut que ces variations satisfassent à la relation.

$$L\frac{dt}{t} + N\frac{dp}{p} = 0.$$

5. Pour qu'un système chimique homogène ou à tensions fixes soit en équilibre, il faut, et il suffit, que les potentiels de ses éléments, rapportés à l'unité de masse, soient égaux.

De là s'ensuit que deux systèmes chimiques qui font équilibre à un troisième et qui sont susceptibles de passer de l'un à l'autre, 510 se font équilibre entre eux.

Ces lois, en y joignant celle qui a trait à l'action de masse dans les systèmes homogènes, représentent tout ce que l'on peut tirer des principes généraux de la thermodynamique dans les applications chimiques. Mais elles ne suffisent évidemment pas pour déterminer d'une façon complète les conditions des réactions. Il existe sans aucun doute des principes expérimentaux spéciaux à la chimie qui achèvent de définir ces conditions; mais ces principes sont encore complètement inconnus, et en dehors de la loi des tensions fixes, nous n'en connaissons 520 que quelques cas particuliers (lois des gaz parfaits). Il reste donc encore, au double point de vue expérimental et théorique, beaucoup à faire dans le domaine de la mécanique chimique pour rendre, au moins dans une certaine mesure, cette science comparable, par ses méthodes, à la mécanique rationnelle.

H. Le Chatelier,
Ingénieur en chef des Mines.
G. Mouret,
Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Revue Générale des Sciences,
15 *Mars* 1891.

Les Procédés Nouveaux pour le Raffinage de l'Acier.

De nos jours, la fabrication de l'acier est sortie de l'empirisme pour devenir une opération chimique réglée par des principes rationnels. Le métallurgiste opère sur des masses énormes,

comme le ferait un chimiste dans un creuset de laboratoire; par l'addition de réactifs spéciaux, choisis en connaissance de cause et dosés avec précision, il produit à chaque instant du travail les transformations qu'il veut, corrige les défauts de la matière première, et obtient, presque avec certitude, un métal ayant la composition qu'il s'est proposée.

C'est surtout vers la fin de l'opération que le travail prend le caractère d'une vraie manipulation chimique. A ce moment, le métal est décarburé et partiellement oxydé; on ajoute des réactifs divers destinés à corriger sa composition: c'est ce qu'on peut appeler la phase du raffinage; la réussite y dépend presque exclusivement du bon choix de ces réactifs et de leur dosage.

Je me propose d'étudier les principes de cette opération délicate, et surtout de signaler deux procédes nouveaux qui commencent à s'introduire dans l'industrie, et dont la véritable portée est encore mal connue: je veux parler de l'emploi du carbone pur (procédé Darby) et de celui de l'aluminium.

I

Dans les anciens procédés de fabrication de l'acier naturel au bas foyer ou au puddlage, on cherchait à affiner incomplètement la fonte, de manière à n'oxyder qu'une partie du carbone et à en laisser dans le métal la dose voulue. Pour cela, il fallait opérer très lentement, et on ne réussissait bien qu'avec les fontes manganésées, parce que le manganèse, plus oxydable que le carbone, protégeait ce corps et en retardait l'élimination.

Quand Bessemer eut montré que par l'insufflation de l'air à travers la fonte en fusion, on pouvait oxyder le carbone en quelques minutes, et déterminer une élévation de température assez grande pour que l'acier restât fondu, cette découverte, qui devait révolutionner l'industrie, fut d'abord entravée dans son développement par bien des difficultés de détail.

L'une d'elles provenait de la puissance même du nouveau moyen d'affinage: on ne savait pas la modérer; on dépassait le but; une partie du fer se brûlait et on obtenait un mélange de métal et d'oxyde. L'addition de charbon ou de fonte pure

pouvait bien restituer au bain le carbone nécessaire à la constitution de l'acier; mais elle ne suffisait pas à détruire l'oxyde dont le mélange rend le métal presque impropre à tout usage. 40

Le nouveau procédé ne devint d'abord pratique qu'en Suède, où l'on traitait des fontes manganésées. Tant qu'il reste du manganèse à brûler, l'oxygène ne se porte pas sur le fer: on peut alors opérer par la méthode *directe*, c'est-à-dire qu'on arrête l'insufflation de l'air avant d'avoir éliminé tout le carbone, lorsqu'il en reste assez pour constituer la qualité d'acier qu'on veut obtenir.

Avec les fontes ordinaires, la méthode directe ne donnerait pas un métal sain, parce que l'oxyde de fer qui reste mélangé au bain commencerait à se former avant que la teneur en carbone 50 fût réduite aux proportions voulues. Cela tient à ce que la carbone ne réduit pas cet oxyde aussi énergiquement que le manganèse.

Ces difficultés disparurent, et le procédé Bessemer put prendre son merveilleux essor dès qu'un autre métallurgiste anglais, Mushet, comprenant ce rôle du manganèse, imagina de l'introduire à la fin de l'opération, sous forme de fonte manganésée, riche (*spiegel-eisen*, ou fonte miroitante).

Depuis, on opère presque partout suivant cette formule: c'est ce que l'on appelle la méthode *indirecte*. On insuffle l'air jusqu'à 60 ce que tout le carbone soit brûlé; on a alors un mélange de fer et d'oxyde, et on ajoute la dose voulue de *spiegel*, pour détruire l'oxyde, et recarburer le fer de manière à le changer en acier.

Cet alliage, qui contient 12 à 20 % manganèse, et 5 à 6 % de carbone, a donc à remplir un double rôle: c'est à la fois un agent de raffinage et de recarburation. Le carbone se combine au fer; le manganèse opère le raffinage en réduisant l'oxyde de fer. Il se substitue à ce métal pour former un oxyde plus fusible, qui, au lieu de rester mélangé au bain, se scorifie, passe à l'état de silicate et surnage. Le métal devient sain et homogène. 70

Ce réactif précieux est employé de la même manière quand on fabrique l'acier au four Martin. La fonte est alors fondue avec du fer sur la sole d'un four chauffé au gaz, et le carbone, au lieu de s'oxyder rapidement, s'élimine peu à peu par l'action de

l'oxygène des flammes ou des scories. Mais on dépasse presque toujours le point, on prolonge l'opération jusqu'à décarburation presque complète, et on régénère le bain en ajoutant du *spiegel*.

Tant qu'on n'a disposé que de *spiegels* ordinaires, les nouveaux procédés ont été limités à la production d'aciers durs ou demi-
80 durs. En effet, on ne peut réduire la dose de manganèse qu'on ajoute, au-dessous de la limite nécessaire pour détruire tout l'oxyde de fer. Il faut pour cela 8 à 10 °/₀ de *spiegel*. On est donc forcé d'introduire au moins $\frac{5}{1000}$ de carbone ; d'ailleurs, le métal retient toujours un peu de manganèse qui ne s'oxyde pas, et qui le durcit encore davantage. Dans ces conditions, l'acier a au moins 50 ou 60 kilos de résistance, et au plus 10 à 15 °/₀ d'allongement.

Pour faire des aciers plus doux, que fallait-il ? Opérer le raffinage au même degré, tout en modérant la recarburation,
90 c'est-à-dire introduire autant de manganèse avec moins de carbone. Comme on ne peut pas fabriquer de fontes manganésées qui ne soient très riches en carbone, le seul moyen était de les rendre plus riches en manganèse. Peu à peu on a surmonté les difficultés que présente la réduction du manganèse au haut fourneau, et on est arrivé à obtenir industriellement des alliages riches, des ferro-manganèses dont la teneur dépasse parfois 80 °/₀.

On pouvait donc employer ce nouveau réactif à des doses trois ou quatre fois plus faibles, et réduire à moins de $\frac{2}{1000}$ la
100 proportion de carbone qu'on ajoute (la teneur en carbone de ces alliages reste toujours à peu près la même).

On est arrivé ainsi à produire des aciers qui ne prennent plus du tout la trempe, dont la résistance peut descendre à moins de 40 kilos, et l'allongement aller à plus de 25 °/₀. Ce sont de véritables fers doux fondus, plutôt que des aciers.

On peut employer moins de 1 °/₀ de ferro-manganèse riche ; il semblerait donc que la teneur en carbone pût être réduite à un demi-millième. Mais l'élimination de ce corps avant le raffinage n'est jamais rigoureusement complète : au moment où l'on
110 arrête, il reste encore un à deux millièmes de carbone dans le bain. Si on allait plus loin, il se formerait trop d'oxyde de fer,

et on serait obligé d'ajouter plus de ferro-manganèse. Il y a donc une limite minima imposée par la pratique, et ce n'est qu'avec des ferro-manganèses extra-riches qu'on peut arriver à fabriquer des aciers à deux millièmes de carbone.

Dans la fabrication de l'acier par les procédés basiques, les réactifs manganésés ont conservé leur rôle essentiel. On sait que la différence entre ces nouvelles méthodes et les anciennes consiste essentiellement à faire les opérations dans des fours garnis de dolomie ou de magnésie; on peut alors, par des 120 additions de chaux, obtenir des scories très basiques qui auraient rongé et dissous les revêtements siliceux, seuls employés autrefois. Ces scories deviennent capables d'absorber le phosphore à l'état d'acide phosphorique; de sorte qu'on élimine ce corps nuisible et qu'on peut employer les fontes phosphoreuses, au lieu d'être obligé de choisir des fontes pures.

L'élimination du phosphore ne s'achève guère qu'après celle du carbone, qui, tant qu'il existe en quantité notable, réduit l'acide phosphorique. On est donc obligé de pousser l'affinage. plus loin, on obtient un bain plus décarburé et plus chargé 130 d'oxyde que dans le procédé acide.

On est donc amené, par suite, à ajouter plus de manganèse pour le raffinage. D'autre part, il y a intérêt à introduire le moins de carbone possible, pour éviter la réintégration du phosphore: car le carbone, réagissant sur l'acide phosphorique des scories, fait toujours repasser dans le métal un peu de phosphore réduit.

On emploie de préférence le ferro-manganèse ou les *spiegels* riches. D'ailleurs, avant d'introduire le réactif, on procède à un décrassage soigné pour enlever autant que possible la scorie: le 140 plus souvent, au lieu de faire l'addition dans le four comme autrefois, on place le ferro-manganèse dans la poche de coulée, et on verse dessus l'acier séparé des scories.

Avec ces précautions, on limite la réintégration du phosphore à un millième environ.

Dans le four basique, le manganèse a moins de tendance à se scorifier que dans le four acide, parce que la silice, qui a une grande affinité pour l'oxyde de manganèse, est déjà sursaturée

d'autres bases. On perd donc moins de manganèse par oxyda-
150 tion directe, et il en reste davantage dans le métal.

Pour tous ces motifs, les aciers basiques sont, à dureté égale, plus manganésés et moins carburés que les aciers acides. La teneur en manganèse y atteint souvent près du double de la teneur en carbone.

Il est plus difficile de fabriquer par ce procédé des aciers durs, quoique ce ne soit pas impossible avec un décrassage très soigné, qui rend l'introduction du carbone à peu près inoffensive. En revanche, comme le manganèse à faible dose donne beaucoup moins de dureté que le carbone, on arrive à fabriquer des aciers
160 extra doux, ayant 30 kilos de résistance et 30 % d'allongement, comme les fers les plus purs.

Tels étaient, il y a deux ans à peu près, les seuls procédés de raffinage employés pour les aciers ordinaires. Il nous reste à dire quelques mots des réactifs spéciaux usités dans la préparation des aciers, dits sans soufflures.

L'addition du *spiegel* dans l'acier fondu provoque un bouillonnement dû à la formation d'oxyde de carbone: le bouillonnement continue quand on verse le métal dans les lingotières, et quand il devient pâteux par le refroidissement, les gaz ne
170 pouvant plus se dégager restent emprisonnés dans une foule de cavités qui rendent le lingot poreux. L'acier ne peut redevenir compact qu'après un forgeage prolongé, qui aplatit et ressoude ces soufflures.

Pour obtenir à la coulée un métal sain, susceptible d'être utilisé sous forme de moulage comme la fonte, on a cherché un réactif qui ne dégageât pas d'oxyde de carbone. On y est arrivé en faisant intervenir le silicium.

Ce corps, qui a pour l'oxygène plus d'affinité encore que le manganèse, l'absorbe et l'empêche de se porter sur le carbone.
180 En ajoutant au bain de la fonte très siliceuse, non seulement il ne se produit pas de bouillonnement, mais on voit se calmer l'ébullition légère qui existait avant le raffinage, par suite de la petite quantité de carbone restée encore dans le métal.

On a d'abord employé le ferro-silicium (fonte à 10 à 15 % de silicium) ; mais on n'obtenait pas encore d'aciers tout à fait

sains : on évitait bien les soufflures ; seulement la silice, en se combinant avec l'oxyde de fer, forme des silicates infusibles dont il reste de petits fragments dans le bain : le métal est souillé par le mélange de parcelles de scorie. On évite cet inconvénient par l'emploi du *silico-spiegel* : c'est une fonte difficile à fabriquer au 190 haut fourneau, qui contient de 8 à 10 °/₀ de silicium, avec 15 à 20 °/₀ de manganèse. Ces deux corps s'oxydent à la fois et forment des silicates fusibles qui surnagent : le métal se sépare bien de la scorie.

Depuis qu'on sait obtenir cet alliage complexe au haut fourneau, la fabrication des moulages d'acier est devenue pratique, mais elle est restée délicate. Sans parler des difficultés provenant de la structure cristalline que le métal prend au refroidissement et qu'on cherche à modifier par des trempes convenables, le réactif doit être dosé avec précision. S'il reste du silicium 200 dans l'acier, ce corps, surtout en présence du carbone, donne de l'aigreur au métal : il ne peut guère en supporter plus de 3 millièmes. D'autre part, si on n'en met pas assez, il reste des soufflures : il faut donc une grande expérience, une appréciation très exacte de l'état d'oxydation du bain, pour évaluer la dose convenable et le moment où l'addition doit être faite. En pratique, les moulages, surtout pour les grosses pièces, sont souvent de qualité irrégulière, et on n'arrive pas avec sûreté à la suppression totale des soufflures.

II

Tous les réactifs énumérés présentent ce caractère commun 210 que le manganèse y joue un très grand rôle. En outre, c'est toujours d'un seul alliage qu'on se sert pour remplir un double but, le raffinage (qui consiste à réduire l'oxyde de fer) et la recarburation (qui consiste à transformer le métal en acier par la combinaison du fer avec du carbone). Il en résulte qu'il y a une relation *nécessaire* entre les quantités de carbone ajoutées et celles des corps servant au raffinage (manganèse ou silicium). Le rapport entre les deux teneurs $\frac{C}{Mn}$ est compris entre certaines limites. On a pu le diminuer au-dessous de 1 par l'emploi du

220 ferro-manganèse: on ne peut le faire monter au-dessus de 1.50. En d'autres termes, on ne peut faire d'aciers contenant beaucoup de carbone et peu de manganèse.

C'est un inconvénient grave quand il s'agit de fabriquer des aciers durs. Les bons aciers à outils, tels qu'on les obtient par les anciens procédés de cémentation et de fusion au creuset, sont des métaux purs, contenant 8 à 12 millièmes de carbone, et seulement des traces d'autres corps étrangers. Ces aciers ont des qualités précieuses; ils durcissent beaucoup par la trempe; mais ils ont du corps, et ne deviennent pas cassants. Les aciers 230 durs, riches en manganèse (les seuls qui fussent faciles à fabriquer par les procédés Bessemer ou Martin), sont aigres et éclatent à la trempe si on n'opère pas avec des soins tout particuliers.

Pour rester maître du dosage relatif du carbone et du manganèse, il n'y a qu'à les ajouter séparément. On a, en somme, deux réactions différentes, mais également nécessaires à produire: le raffinage, c'est-à-dire la réduction de l'oxyde de fer, et la recarburation. Pourquoi prétendre les réaliser avec un seul réactif? C'est se créer des difficultés gratuites. Ne vaut-il pas mieux séparer les fonctions et prendre pour chacune d'elles le corps 240 qui la remplit le mieux, par exemple, faire d'abord le raffinage avec du ferro-manganèse, puis après avoir ainsi obtenu du fer à peu près pur, lui ajouter dans une autre forme la dose de carbone nécessaire à la constitution de l'acier?

Cette solution, qui paraît si simple quand on a bien analysé les phénomènes, les praticiens commencent seulement à l'adopter aujourd'hui, et ils y sont arrivés par de longs détours.

Bessemer avait tout d'abord essayé les additions de charbon ou de fonte d'hématite (fonte pure, où le carbone n'est allié qu'à du fer). Il ne réussit pas, parce que le carbone seul ne 250 réduisait pas assez énergiquement l'oxyde de fer dissout dans le bain. On avait demandé à ce corps un double service, celui d'agent de raffinage et de recarburation: il n'était propre qu'au second. On en conclut trop vite qu'il n'était bon à rien, qu'employé seul il s'alliait mal au fer, et dès qu'on eût découvert l'utilité du manganèse, on ne songea plus à employer autre chose que les alliages de ce métal.

Un ingénieur anglais, M. Darby, a repris récemment l'emploi
du carbone. Il a cru d'abord qu'il fallait faciliter sa combinaison
avec le fer par un contact prolongé, et il a construit des appareils
où l'on faisait en quelque sorte filtrer l'acier fondu à travers du 260
graphite ou du charbon de cornues. Le dispositif était com-
pliqué : il ne permettait pas de régler facilement la dose de car-
bone absorbée. On a reconnu que cette complication était
inutile.

Il suffit de placer le carbone en poudre dans la poche de
coulée et de verser sur lui le métal fondu. La combinaison se
fait très bien. La seule condition essentielle, c'est que le fer ait
été préalablement désoxydé par l'addition d'un peu de man-
ganèse.

On ajoute donc d'abord dans le four (après décrassage des 270
scories), du ferro-manganèse ou du *spiegel* riche, en quantité
strictement suffisante pour que l'oxyde de fer soit régéneré, mais
qu'il ne reste que des traces de manganèse dans le bain. Le
métal ainsi raffiné, mais peu carburé, est versé dans la poche où
l'on a placé d'avance du charbon en poudre. On peut employer
du graphite, du charbon de bois, de l'anthracite ou même du
coke : il suffit que le carbone soit à peu près exempt de matières
volatiles, et ne contienne pas trop de cendres.

Il en disparaît toujours un peu par l'oxydation ; on peut
compter que les $\frac{3}{5}$ environ du carbone ajouté se retrouvent dans 280
l'acier. On obtient, par ce moyen, des aciers ayant le degré de
carburation voulue, et dans lesquels la teneur en manganèse peut
être limitée au besoin à 3 millièmes, dose où il est absolument
inoffensif.

Je ferai remarquer l'analogie des nouvelles méthodes que je
viens de décrire avec le procédé classique de la cémentation.
Dans ce dernier (encore appliqué aujourd'hui pour les aciers à
outil de qualité supérieure), on prend du fer pur en barres,
obtenu par l'affinage lent de fontes de choix, on le carbure en le
chauffant dans des caisses avec du charbon de bois, et on obtient 290
ainsi des barres d'acier brut qu'il faut fondre au creuset pour
avoir un métal homogène. Au Bessemer ou au Martin, on affine
également la fonte jusqu'au bout, de manière à obtenir du fer

pur : puis ce métal fondu est recarburé immédiatement. Les deux phases principales de l'élaboration restent les mêmes au point de vue chimique: mais elles se succèdent sans interruption et sont réunies dans une seule opération rapide, faite à haute température, dans des conditions où les réactions sont plus vives. Tout le travail, affinage, carburation et fusion, se fait
300 d'un seul coup, sur de grandes masses, d'où une diminution considérable du prix de revient.

Pour compléter la comparaison, je rappellerai que lorsqu'on veut obtenir des fers supérieurs destinés à la cémentation, il faut affiner des fontes pures, plus ou moins manganésifères : dans les procédés actuels, on traite des fontes ordinaires, mais on ajoute du manganèse à la fin de l'opération. Ce corps joue donc le même rôle dans les deux cas. On croyait autrefois que certains minerais étaient seuls capables de fournir de l'acier, on leur attribuait une sorte de vertu mystérieuse, et cette superstition a
310 été difficile à ébranler. Au fond, leur supériorité était de donner naturellement des fontes manganésées exemptes de phosphore. Aujourd'hui, comme on sait enlever le phosphore et ajouter le manganèse, on peut prendre comme matière première n'importe quelle fonte.

J'ai dit plus haut que la combinaison directe du carbone avec le fer fondu se faisait très bien. Il ne faudrait pas en conclure qu'il est facile d'obtenir de grandes masses d'acier homogènes. Le carbure de fer a une tendance à se liquater ; il se réunit de préférence au centre et à la partie supérieure des lingots. Mais
320 c'est là une difficulté qui n'est pas inhérente au procédé Darby. Elle se présente toutes les fois qu'on coule de grandes pièces, quelqu'ait été le mode de carburation.

III

Depuis que les nouveaux procédés électriques ont abaissé le prix de l'aluminium, on a employé ce métal au raffinage de l'acier : il a donné des résultats remarquables. Cependant, l'opinion n'est pas encore bien assise sur son efficacité réelle : certains auteurs l'ont beaucoup surfaite, et lui ont prêté des

vertus incroyables. Ce nouveau métal a été prôné avec en enthousiasme allant parfois jusqu'au lyrisme. Les seuls métallurgistes qui, à ma connaissance, aient donné sur cette 330 question des études impartiales et sérieuses, MM. Howe et Hadfield, n'ont pas manqué d'exercer leur *humour* aux dépens des panégyristes de l'aluminium. L'un se demande si le pouvoir occulte de ce réactif doit s'expliquer par une conjonction de planètes; l'autre remarque qu'on lui attribue neuf propriétés spéciales, et que si on s'est arrêté à ce nombre, c'est sans doute en souvenir des neuf Muses.

Au risque de tomber sur un autre chiffre mystique, on peut reconnaître à l'aluminium trois avantages sur les réactifs employés jusqu'ici: 1° c'est un désoxydant énergique; 2° il 340 augmente la fluidité de l'acier doux: 3° il prévient, mieux que tout autre corps, la production des soufflures.

1° L'aluminium, bien qu'il soit difficile à oxyder directement, réduit à chaud presque tous les oxydes métalliques. Par sa combinaison avec un équivalent d'oxygène, il dégage plus de chaleur qu'aucun autre élément sauf les métaux alcalins et alcalino-terreux. C'est donc à ce point de vue un réactif plus énergique que le silicium et le manganèse. Plusieurs circonstances viennent augmenter son efficacité pour éliminer l'oxyde de fer de l'acier fondu. Il est fusible, léger et se mélange facile- 350 ment au bain; il se répand dans toute la masse; il entre en contact intime avec toutes ses parties, ce qui facilite la réaction. En décomposant l'oxyde de fer, il donne l'alumine, corps léger, sans affinité pour l'oxyde de fer ni pour la silice; cette alumine reste à l'état libre et se sépare facilement du métal; on la retrouve en enduits blancs sur les géodes du haut du lingot: le manganèse, et surtout le silicium donnaient les oxydes qui formaient, avec celui du fer, des scories lourdes, plus sujettes à rester mélangées à l'acier. Il n'est donc pas étonnant qu'on obtienne plus facilement avec l'aluminium des lingots sains. 360

D'ailleurs, l'énergie de ce réactif permet de l'employer sans excès. Une dose d'un millième suffit en général: on dépasse rarement deux ou trois millièmes; presque tout s'élimine par l'oxydation: il ne reste dans le métal, à l'état d'aluminium allié,

que des traces qui, souvent, échappent à l'analyse. C'est un avantage considérable de pouvoir opérer le raffinage avec de si petites quantités; on n'est plus exposé à introduire dans le métal des corps étrangers en proportion assez forte pour altérer ses propriétés.

370 2° Un autre effet, moins facile à expliquer, mais incontestable, c'est que l'aluminium augmente la fluidité de l'acier. Un lingot auquel on en a ajouté se creuse beaucoup plus par le refroidissement, parce que le centre reste plus longtemps liquide et susceptible de se tasser. Il peut même en résulter des inconvénients: quand on coule directement dans les lingotières, comme cela se fait dans certaines usines, et qu'on place des morceaux d'aluminium au fond, comme le métal se solidifie instantanément sur les parois, le retassement produit au milieu un vide qui peut atteindre une longueur exagérée et rendre le 380 lingot impropre à tout usage.

Pour expliquer cette fluidité, on a dit que la présence de l'aluminium abaissait sensiblement le point de fusion de l'acier: cette hypothèse est invraisemblable, si l'on songe qu'il ne reste dans le métal que des traces du réactif; d'ailleurs, M. Osmond a reconnu qu'un acier à 5 % d'aluminium, c'est-à-dire en contenant 20 ou 30 fois plus que la dose ordinaire, a son point de fusion à peine inférieur de 25° à celui d'un acier pur.

On a proposé une explication plus rationnelle dans l'échauffement de température produit par l'oxydation de l'aluminium. 390 Cet échauffement est réel, mais il doit être très limité. On l'a évalué à 40 ou 50° par des calculs qui me semblent peu rigoureux. La combinaison d'un équivalent d'oxygène avec l'aluminium dégage 65 calories; mais il faut en défalquer 34 absorbées par la réduction d'un équivalent d'oxyde de fer. La chaleur de combinaison de l'aluminium avec le fer est certainement très faible par rapport à celle d'oxydation. Un gramme d'aluminium ne dégagera donc pas plus de 4 calories. Réparties sur 1 kilogramme de fer, dont la chaleur spécifique à l'état liquide est au moins de 0,20 (c'est à peu près sa valeur à la 400 température de 1500°), elles ne produiront qu'un échauffement de 20°. C'est peu de chose par rapport aux effets constatés.

Il est probable que la fluidité s'accroît surtout par l'élimination plus complète de l'oxyde de fer : car il suffit de peu d'oxyde mélangé pour rendre un métal pâteux.

L'emploi de l'aluminium offre l'avantage de ne pas introduire du tout de carbone ; il est donc spécialement indiqué pour la fabrication des aciers doux. Le métal connu sous le nom de *fer Mitis* est du fer presque pur coulé sous forme de moulages, grâce à l'addition d'un peu d'aluminium.

Pour les aciers durs, ce réactif réussit moins bien : on dit qu'il 410 les épaissit au lieu de les rendre plus liquides. Cela doit arriver surtout quand on ajoute des doses trop fortes, et qu'une portion considérable échappe à l'oxydation pour rester alliée au fer. Sous cette forme, l'aluminium, comme le silicium, jouit de la propriété de déterminer la séparation du carbone à l'état de graphite. Il détruit donc une partie du carbure de fer et modifie profondément la constitution de l'acier. Mais cet effet ne doit pas se produire avec de faibles doses.

3° L'expérience montre que l'aluminium ajouté, même en très petites quantités, arrête le bouillonnement de l'acier, bien mieux 420 encore que les réactifs siliceux et permet d'obtenir des aciers sans soufflure. L'augmentation de fluidité, déjà signalée, diminue certainement les chances de soufflure. Mais par quel mécanisme ce réactif peut-il calmer subitement l'ébullition ? Cette question se rattache à celle de la nature et de la cause même des dégagements gazeux. Nous ne pouvons que l'effleurer ici.

On sait que, dans un bain d'acier contenant de l'oxyde dissous, le carbone réagit sur cet oxyde et produit de l'oxyde de carbone qui s'échappe avec bouillonnement. On admettait 430 autrefois que c'était la cause principale, sinon unique des dégagements gazeux. Cette idée, soutenue notamment par M. Pourcel, a conduit à des découvertes utiles, car c'est elle qui a engagé à étudier l'action du silicium, et qui a mis sur la voie des moyens de fabriquer l'acier sans soufflures.

L'action spéciale du silicium s'expliquait tout naturellement : il s'empare de l'oxygène en formant un produit solide, la silice ; il prévient donc la formation de l'oxyde de carbone. L'alu-

minium doit évidemment produire le même effet, et d'une
440 manière plus complète, parce qu'il a plus d'affinité pour
l'oxygène.

Cette théorie simple, qui paraissait rendre compte de tous les faits, a cependant été battue en brèche par les expériences du Dr. Muller. Il a montré que les gaz dégagés se composent, pour la majeure partie, d'hydrogène. Ainsi, le bouillonnement a surtout une cause physique : l'acier liquide contient, à l'état de dissolution, plus d'hydrogène qu'il ne peut en garder lorsqu'il est devenu solide. C'est cet excès qui se dégage pendant le refroidissement. Pour qu'il n'y eût pas de dégagement, il faudrait que
450 tout le gaz dissous à chaud pût rester dans le métal, c'est-à-dire que sa solubilité ne diminuât pas avec la température.

Or, MM. Troost et Hautefeuille ont montré que le silicium diminue la solubilité à chaud, dans l'acier fondu : d'autre part, le manganèse augmente la solubilité à froid, dans l'acier solide. Les aciers manganésés, tout en n'ayant pas de soufflures, contiennent beaucoup plus d'hydrogène occlus que les autres.

Ainsi, la présence simultanée de ces corps (qu'on introduit par le *silico-spiegel*) peut réaliser la condition demandée, la proportion d'hydrogène que dissout le bain cesse d'être supérieure à
460 celle qui pourra rester occluse dans le lingot ; il n'y a plus de raison pour que ce gaz se dégage.

Ces réactifs n'auraient donc qu'une action physique. Cette explication parfaite en théorie, n'est pas cependant de nature à satisfaire entièrement ceux qui ont observé le phénomène dans les usines. Elle ne rend pas bien compte de l'apaisement subit qui se produit par des additions de réactif en quantité très faible. Un corps étranger ne peut modifier les propriétés physiques d'un métal qu'à condition d'y rester en proportions sensibles : comment se fait-il que l'aluminium, celui des réactifs qu'on
470 ajoute à la dose la plus faible, et qui s'élimine le plus complètement, soit en même temps celui qui apaise le mieux les dégagements gazeux ?

N'y a-t-il pas là un fait de nature à montrer que l'action chimique a une importance prépondérante, car l'aluminium, qui s'oxyde presqu'en entier, ne saurait modifier notablement les

propriétés du métal et son efficacité supérieure ne peut guère s'expliquer que par la réaction énergique exercée sur les oxydes.

Je proposerai à ce sujet une hypothèse qui m'est suggérée par la comparaison de phénomènes analogues plus faciles à étudier. On sait que, dans un liquide sursaturé de gaz dissous, 480 l'agitation peut provoquer un dégagement qui n'avait pas lieu : c'est ainsi qu'on fait mousser le champagne ou la bière en frappant sur la bouteille. On produirait le même effet en y insufflant de l'air. D'autre part la présence de bulles d'air libre dans un liquide facilite le dégagement des vapeurs : l'ébullition de l'eau est retardée quand elle est absolument privée d'air.

Si donc nous considérons un bain d'acier sursaturé d'hydrogène dissous, l'équilibre pourra se trouver rompu par la naissance, au sein de cette masse, de bulles d'un autre gaz libre, et ce phénomène provoquera le dégagement d'une partie de 490 l'hydrogène. C'est ce qui arriverait quand il se produit de l'oxyde de carbone, et il suffirait d'empêcher sa formation pour que l'hydrogène restât dissous.

L'oxyde de carbone, tout en ne formant qu'une faible partie du dégagement gazeux, serait l'agent nécessaire et suffisant pour amorcer le bouillonnement. On s'expliquerait ainsi que les réactifs capables d'absorber l'oxygène sans produire des gaz calment l'ébullition même à dose très faible. Les idées soutenues par M. Pourcel et confirmées par des résultats pratiques se trouveraient ainsi d'accord avec la théorie ; l'oxyde 500 de carbon serait bien le véritable ennemi, non par lui-même, il est vrai, mais par son action indirecte sur les autres gaz dont il provoque le dégagement.

Je ne prétends pas nier l'action physique que ces mêmes corps peuvent exercer en modifiant la solubilité de l'hydrogène. Je la crois réelle, surtout pour le manganèse, car cet élément ne prévient les soufflures qu'à condition de rester dans l'acier en proportion assez forte. Pour le silicium, qu'on emploie à dose beaucoup plus faible, et dont il reste peu dans le métal, s'il modifie avantageusement la solubilité, il doit aussi une partie, 510 peut-être la plus importante, de son efficacité à son action chimique, à sa propriété d'empêcher la production d'oxyde de

carbone. Enfin l'aluminium, qu'on emploie à dose homœopathique et qui disparaît presque tout entier, doit jouer exclusivement un rôle chimique, en absorbant tout l'oxygène sans production de gaz.

En somme, tous les avantages de l'aluminium seraient la conséquence indirecte de la facilité avec laquelle ce corps élimine l'oxyde de fer : ils se rattacheraient à une seule et même pro-
520 priété, son affinité pour l'oxygène, jointe à sa fusibilité qui lui permet de réagir rapidement sur toute la masse liquide. A ce point de vue, les métaux alcalins et le magnésium pourraient seuls l'égaler, peut-être le surpasser, si leur emploi était pratique.

Quoi qu'il en soit, on emploie avec succès l'aluminium pour éviter les soufflures dans les aciers moulés, qui ont en général une résistance de 50 à 60 kilos et une teneur en carbone de 5 à 6 millièmes. Souvent on commence le raffinage avec du *spiegel* qui sert en même temps à recarburer, puis on ajoute l'aluminium dans la poche de coulée, où sa présence calme instantanément
530 l'ébullition. On obtient ainsi des moulages plus sains que par l'emploi du *silico-spiegel*.

On a d'abord employé l'aluminium sous forme d'alliage avec le fer. Le ferro-aluminium, tel qu'on le fabriquait au début des procédés électriques, ne contenait pas plus de 10 °/ₒ de métal actif. Cet alliage avait l'inconvénient d'être très peu fusible. Il fallait le chauffer au blanc avant de l'ajouter à l'acier. D'ailleurs, il ne peut se conserver longtemps sans altération. Peu à peu on a fabriqué des alliages plus riches. Aujourd'hui on emploie de préférence l'aluminium pur (du moins celui qui est vendu sous
540 ce nom, mais qui est loin d'approcher de l'état de pureté chimique). Grâce à sa grande fusibilité, on peut en placer les morceaux froids dans la poche de coulée. Ils fondent au contact de l'acier, et s'élèvent à travers le bain en réagissant vivement sur toutes ces parties. La réaction est immédiate et le contact intime.

Plusieurs praticiens admettent adjourd'hui qu'il faut employer, dans la fabrication de l'acier, de l'aluminium pur. Cette opinion ne me paraît pas justifiable ; je serais bien tenté d'y voir une de ces superstitions qui s'accréditent souvent en métallurgie, par

suite de la difficulté où l'on est d'analyser tous les facteurs des 550
phénomènes complexes dont on ne saisit que le résultat pratique.

Les deux corps qui se rencontrent dans l'aluminium pur sont le fer et le silicium. Au point de vue des réactions chimiques, il est bien évident que la présence du fer est indifférente. Quant au silicium, son action est la même que celle de l'aluminium ; il n'y a qu'une différence d'intensité : sa présence, à dose modérée, ne peut donc être nuisible. La seule condition à remplir, c'est que ces deux corps ne soient pas en quantité suffisante pour modifier les propriétés physiques de l'alliage, surtout sa légèreté 560
et sa fusibilité.

Le fer, à moins de 5 ou 6 %, ne semble pas avoir d'action sensible. Le silicium ne modifie pas la densité, et il augmente la fusibilité.

Je crois que des alliages à 10 ou 15 % de silicium, avec 6 ou 10 % de fer, remplaceraient parfaitement l'aluminium pur. Leur adoption par les fabricants d'acier offrirait un grand intérêt : on pourrait les fabriquer à beaucoup plus bas prix que l'aluminium, parce qu'on les obtiendrait en soumettant à l'électrolyse la bauxite brute. On pourrait même songer à utiliser le métal très 570
siliceux extrait des argiles ordinaires.

Il est á désirer que des essais méthodiques viennent trancher la question, déterminer l'effet que produit dans le traitement de l'acier l'aluminium siliceux, et la limite de teneur au-dessus de laquelle le silicium offrirait des inconvénients réels.

L'aluminium étant un réactif cher, il y a intérêt à en réduire la consommation. Lorsqu'on n'aura pas de raison pour proscrire absolument le manganèse, il semble logique d'adopter la formule suivante : 1° Raffinage par le ferro-manganèse (aciers doux) ou par le *spiegel* (aciers durs), ces réactifs étant ajoutés 580
dans le four ou dans une première poche de coulée, s'il faut éviter leur action sur les scories phosphoreuses ; 2° Transvasement dans une poche où on a placé le carbone en proportion nécessaire pour achever la carburation, avec quelques fragments d'aluminium pour éviter les soufflures.

Chaque élément est ainsi introduit à part, à la dose juste

convenable pour remplir son rôle spécifique: le manganèse intervient d'abord comme réducteur des oxydes, plus efficace que le carbone et moins coûteux que l'aluminium ; le carbone arrive
590 à son tour pour se combiner au fer épuré, et l'aluminium est là pour empêcher le carbone de s'oxyder en provoquant des dégagements gazeux et des soufflures.

Le travail est ainsi parfaitement réparti ; l'élaboration complète, le procédé élastique, facile à régler, et on peut obtenir à quelques millièmes près un metal de composition déterminée.

Le transvasement de la première poche de coulée dans la seconde, que j'ai indiqué d'une manière éventuelle, n'est pas comme on pourrait le croire, une complication matérielle fâcheuse. Il a l'avantage de mieux brasser le métal, et de le
600 rendre plus homogène: on l'a déjà, pour ce motif, adopté dans plusieurs aciéries où il n'a pas d'autre raison d'être et où on n'ajoute aucun réactif spécial dans la seconde poche.

M. Hadfield a montré dans une série d'études sur l'acier à l'aluminium que ce corps avait sensiblement la même action que le silicium. Il se demande si sa supériorité n'est pas seulement apparente, et due à ce qu'on l'emploie à peu près pur tandis que le silicium n'est introduit qu'à l'état d'alliages pauvres (le ferro-silicium ordinaire ne dépasse guère la teneur de 10 %; il atteint au plus celle de 15 à 20). Dans cette hypothèse, le silicium
610 pur, ou du moins des alliages riches de ce corps, si on arrivait à en préparer à bon marché, pourraient prendre dans la fabrication de l'acier la place de l'aluminium.

Je ne partage pas entièrement cette opinion: l'aluminium offre deux avantages qu'il ne perdra pas: 1° son affinité plus grande pour l'oxygène, démontrée par ce fait qu'il réduit la silice, en fait un réactif plus énergique pour la désoxydation ; 2° sa fusibilité lui permet de se mélanger au bain plus rapidement, plus intimement que le silicium, et en rend l'emploi plus facile.

Je crois donc que l'emploi de l'aluminium est appelé à se
620 généraliser pour toutes les variétés d'acier, de même que le procédé Darby doit devenir d'une application courante pour les aciers durs. Bien compris et bien maniés, ces deux procédés permettront sans doute à l'industrie de sortir du cercle des

aciers manganésés, et de fabriquer en grand, au Bessemer ou au Martin, les aciers supérieurs exclusivement carburés, qui jusqu'à présent ne pouvaient se faire qu'au creuset.

U. LE VERRIER,
Professeur de Métallurgie au Conservatoire des Arts et Métiers.

Revue Générale des Sciences,
30 *Septembre* 1891.

LA RADIO-ACTIVITÉ DE LA MATIÈRE.[1]

La propriété que possèdent certains corps d'émettre un rayonnement invisible et pénétrant, était inconnue il y a six ans. Le mouvement d'idées que suscitèrent les expériences de Rœntgen conduisit à rechercher si la matière n'émettrait pas de semblables radiations et l'on pensa d'abord au phénomène de la phosphorescence, qui réalisait un mode connu de transformation et d'émission de l'énergie. Cette idée ne devait pas s'appliquer au phénomène qui nous occupe, mais elle fut cependant féconde. Elle conduisit à choisir, parmi les corps phosphorescents, les sels d'uranium, dont la constitution optique est remarquable par la série harmonique des bandes de leurs spectres d'absorption et de phosphorescence. C'est expérimentant avec ces corps que j'ai vu, en 1896, le phénomène nouveau dont je me propose d'exposer l'étude.

Ce furent des lamelles de sulfate double d'uranium et de potassium qui servirent à mes premières expériences. Après avoir posé une de ces lamelles sur le papier noir qui enveloppait une plaque photographique et l'avoir laissée ainsi pendant quelques heures, j'observai, en développant la plaque, que le sel d'uranium avait émis des rayons actifs, traversant le papier noir, ainsi que divers écrans interposés entre le corps rayonnant et la plaque (lamelles minces de verre, d'aluminium, de cuivre).

[1] Cet article est la reproduction d'une partie de la conférence que M. Henri Becquerel a faite le 7 mars dernier à la *Royal Institution* à Londres.

Je ne tardai pas à reconnaître que le phénomène est indé-
pendant de la phosphorescence et même de toute excitation de
nature connue, telle qu'une excitation lumineuse ou électrique,
ou une variation très notable de température.

Je me trouvais donc en présence d'un phénomène spontané,
30 d'un ordre nouveau. L'absence de cause excitatrice connue
sur un produit préparé depuis plusieurs années dans le labo-
ratoire, permettait de penser que le phénomène eût été le même
à quelque moment qu'on l'eût observé; il devait donc paraître
permanent, c'est-à-dire qu'il ne devait pas manifester un affaiblis-
sement appréciable pendant un temps très long. C'est, en effet,
ce que j'ai pu vérifier depuis six ans. La figure 1 représente la
première épreuve qui m'a révélé la spontanéité du rayonnement;
celui-ci a traversé le papier noir qui enveloppait la plaque et une
lame mince de cuivre en forme de croix. Voici encore la
40 radiographie, faite à la même époque, d'une médaille en
aluminium; l'absorption inégale par les différentes épaisseurs du
métal a fait apparaître l'effigie.

Dès la première observation, j'ai reconnu que le rayonne-
ment nouveau déchargeait à distance, dans l'air les corps
électrisés, phénomène qui donne une seconde méthode pour
étudier ces rayons; la méthode photographique est surtout
qualitative, l'électromètre fournit des éléments numériques de
comparaison.

Au cours de ces premières constatations, je fus, par plusieurs
50 faits dont le principal est le suivant, détourné de la voie dans
laquelle les expériences ultérieures devaient me ramener. Ayant
protégé une plaque photographique par une plaque d'aluminium
de 2 millimètres d'épaisseur et ayant disposé sur l'aluminium
divers échantillons de poudres phosphorescentes, reposant sur
des lamelles de verre et recouvertes de petits tubes en forme de
cloche, comme le montre la figure, l'épreuve obtenue au bout de
quarante-huit heures de pose, et que reproduit la figure, donna
des silhouettes de lamelles de verre telles qu'elles eussent été
produites par la réfraction et la réflexion totale de rayons
60 identiques à ceux de la lumière, mais qui auraient traversé les 2
millimètres d'aluminium. Cette épreuve est unique: je n'ai pu

la reproduire ni obtenir d'action avec le même échantillon de sulfure de calcium, ni avec aucune autre préparation phosphorescente. A la même époque, M. Niewenglowski avait obtenu une impression avec du sulfure de calcium et M. Troost avec de la blende hexagonale. J'ignore encore la cause de l'activité de ces produits et de sa disparition. Ces faits et quelques autres m'avaient conduit à penser que le nouveau rayonnement pouvait être un mouvement transversal de l'éther analogue à la lumière ; l'absence de réfraction et un grand nombre d'autres expériences me firent abandonner cette hypothèse.

Dans cette même année 1896, je reconnus : que tous les sels d'uranium émettent des radiations de même nature ; que la propriété radiante est une propriété atomique, liée à l'élément uranium ; et les mesures électriques me montrèrent que l'uranium métallique est environ trois fois et demi plus actif, pour ioniser l'air, que ne l'est le sulfate double d'uranium et de potassium. La même méthode permit d'étudier le rôle des gaz dans la décharge, de reconnaître qu'une sphère d'uranium électrisée conserve sa charge dans le vide, tandis que, dans l'air, elle se décharge. La vitesse de la chute du potentiel est sensiblement proportionnelle au potentiel, si celui-ci est de quelques volts ; elle devient constante et indépendante du potentiel pour les potentiels très élevés. Le gaz rendu conducteur par le rayonnement conserve cette propriété pendant quelques instants. Entre deux conducteurs maintenus à des potentiels constants, le rayonnement établit, dans l'air, un courant continu.

Ces expériences ont été reprises et variées en 1897 par Lord Kelvin, puis par MM. Beattie et S. de Smolan. En 1897, M. Rutherford montra comment les phénomènes dus à la conductibilité communiquée aux gaz par l'uranium et l'existence d'un maximum dans le courant produit, peuvent s'expliquer dans l'hypothèse de l'ionisation,[1] à laquelle les beaux travaux de M. J.-J. Thomson ont donné tant d'autorité.

[1] L'ionisation est un changement d'état physique des corps qui modifie leurs propriétés au point de vue électrique, et, en particulier leur conductibilité qui, de très faible, peut devenir considérable.

II

En 1898, M. Schmidt et Mme Curie observèrent séparément
100 que le thorium a des propriétés analogues à celles de l'uranium, propriétés qui furent étudiées en particulier par M. Owens et par M. Rutherford. Mme Curie, ayant mesuré l'activité ionisante d'un grand nombre de minéraux contenant de l'uranium ou du thorium, signala ce fait remarquable que plusieurs minerais sont plus actifs que l'uranium métallique. M. et Mme Curie en conclurent qu'il doit exister dans le minerai un corps plus actif que l'uranium ; et ils entreprirent de l'isoler. Traitant alors l'un des plus actifs de ces minerais, la pechblende de Joachimsthal, ils en séparèrent, d'abord, du bismuth actif, auquel ils donnèrent le
110 nom de polonium ; puis, peu après, du baryum très actif, contenant un élément nouveau, le radium.

Ces produits se préparent par des précipitations fractionnées, pour lesquelles on est guidé par les indications de l'électromètre; l'activité des produits obtenus a dépassé cent mille fois celle de l'uranium. Vers la même époque, M. Giesel est parvenu à préparer des substances très actives, et, en 1900, M. Debierne a annoncé l'existence d'un nouvel élément, l'actinium, sur lequel on a jusqu'ici peu de renseignements. De ces diverses préparations, le radium seul est caractérisé comme élément nouveau ;
120 il possède un spectre d'émission formé de lignes qui n'appartiennent à aucun autre corps connu et le poids atomique des sels de baryum radifères augmente avec leur teneur en radium.

Le rayonnement de l'uranium était trop faible pour exciter la phosphorescence des corps. M. et Mme Curie observèrent ce phénomène avec les rayons du radium ; bien plus, les sels de radium se rendent lumineux eux-mêmes ; leur luminosité, comme leur rayonnement, est spontanée. Le rayonnement du radium produit des actions chimiques diverses, colore le verre, transforme l'oxygène en ozone, le phosphore blanc en phosphore
130 rouge ; il ionise non seulement les gaz, mais encore les liquides (pétroles, air liquide) et les solides isolants, tels que la paraffine, en développant dans ce dernier corps une conductibilité résiduelle qui dure fort longtemps après que le rayonnement a

cessé d'agir. Il provoque sur les tissus organiques des brûlures
profondes analogues à celles que font les rayons X.

Un échantillon de radium que M. Curie m'a prêté me permet
de montrer quelques-uns de ces phénomènes : ionisation de l'air,
luminosité, phosphorescence.

J'ai constaté, par l'épreuve photographique que représente la
figure, que le rayonnement du polonium ne traverse pas une 140
mince feuille de papier noir qui formait un petit cylindre fermé
par de l'aluminium ou du mica et au fond duquel était la matière
pulvérulente ; le rayonnement du radium traverse facilement
cette enveloppe : nous verrons qu'il existe, entre les deux
rayonnements, des différences encore plus profondes.

Le rayonnement du radium redonne à certains cristaux et au
verre la propriété d'être phosphorescents par la chaleur, quand
ces corps l'ont perdue par une élévation de température
préalable.

Les phénomènes d'absorption, étudiés soit par la photo- 150
graphie, ou par la phosphorescence, ou par l'ionisation de l'air,
avaient montré l'hétérogénéité du faisceau de radiations émises.
Une observation nouvelle vint élargir le champ de ces
recherches.

Vers la fin de l'année 1899, M. Giesel, puis MM. Meyer et
Schweidler observèrent que le rayonnement de préparations
actives est dévié par un champ magnétique, comme le sont les
rayons cathodiques. De mon côté, à la même époque, sans
avoir eu connaissance de ces expériences, je faisais la même
observation avec le rayonnement du radium. On peut opérer 160
de la manière suivante : sur une plaque photographique
enveloppée de papier noir et placée horizontalement entre deux
pôles d'aimant, on dépose une petite caisse en papier contenant
quelques grains de matière active : le rayonnement est tout
entier rejeté sur la plaque, d'un seul côté.

Presque aussitôt, je reconnus que les rayons du polonium ne
sont pas déviés, et, par suite, qu'il existe deux espèces de rayons,
les uns déviables et les autres non déviables. M. et M^me^ Curie
firent une étude électrique qui leur montra la présence simultanée
des deux espèces de rayons dans le rayonnement du radium, leur 170

inégale perméabilité, variable avec la distance des écrans absorbants. L'épreuve photographique ci-après montre les deux espèces de rayons avec le radium ; j'ai reconnu récemment que l'uranium émet uniquement des rayons déviables, sous la réserve de l'existence de rayons non déviables beaucoup moins actifs. Il existe, en effet, une troisième espèce de rayons, qui ne sont pas déviables, mais sont extrêmement pénétrants ; ils ont été plus particulièrement mis en évidence par M. Villard.

Ainsi, le rayonnement des corps radioactifs comprend trois
180 espèces de rayons : des rayons déviables par un champ magnétique, qui paraissent identiques aux rayons cathodiques ; des rayons non déviables de deux sortes, les uns très absorbables, les autres qui ressemblent à des rayons X très pénétrants. L'uranium émet surtout la première espèce, le polonium n'émet que la seconde, et le radium émet les trois à la fois. . . .

M. et Mme Curie, dans une très belle expérience, ont montré que les rayons du radium chargent négativement les corps qui reçoivent le rayonnement et que la source se charge elle-même positivement. Pour cette double expérience, il est nécessaire
190 que tous les conducteurs et la source elle-même soient enveloppés complètement de matières isolantes, telles que la paraffine. Pour la préparation active étudiée, la charge était de $4 . 10^{-13}$ unités C.G.S. par centimètre carré de surface radiante et par seconde.

De mon côté, je suis parvenu à mettre en évidence et à mesurer la déviation électrostatique en projetant sur une plaque photographique l'ombre déviée d'un écran plan perpendiculaire au champ . . . . . .

Le rayonnement du radium comprend une partie très péné-
200 trante, formée des rayons les moins déviables et de rayons non déviables dont les propriétés semblent les mêmes que celles des rayons de Rœntgen. Ces rayons pénétrants ne sont que très peu absorbés, et, par suite, leur action sur une plaque photographique ou sur l'air est très faible, de sorte que l'on ne peut, par les méthodes précédentes, avoir une idée exacte de leur intensité. Si l'on interpose sur leur trajet un écran très absorbant, ils le traversent partiellement, mais ils s'y transforment,

en partie, en rayons plus absorbables. Cette transformation rappelle celle de la fluorescence ; et, par suite de l'action secondaire, l'effet, immédiatement derrière l'écran, est plus fort 210 que si celui-ci n'existait pas. Une plaque photographique recevant le rayonnement filtré au travers d'une épaisseur de plomb de 1 centimètre s'impressionne plus, sous une plaque de plomb de 1 millimètre d'épaisseur que dans les régions non recouvertes par cet écran. L'épreuve ci-dessous montre l'effet du rayonnement qui sort des parois d'une cuve de plomb après avoir traversé 5 à 12 millimètres de métal.

Ces phénomènes secondaires peuvent rendre compte, en partie, des apparences d'ombres portées que donnent les bords de tous les écrans plus ou moins transparents placés sur les 220 plaques photographiques.

IV

Tous les faits qui viennent d'être exposés sont exclusivement relatifs au rayonnement obscur qui traverse les corps opaques, les métaux, le verre, le mica ; mais il existe un phénomène tout différent, dont les effets sont arrêtés par le verre et par le mica, et sont comparables à ceux que produirait une vapeur d'une nature particulière. Ce phénomène fut découvert en 1899, simultanément par M. Rutherford et par M. et M^{me} Curie.

M. Rutherford, en étudiant le rayonnement du thorium, vit qu'à côté de la radiation ordinaire, il y a un effet produit par 230 une 'émanation,' comparable à une sorte de vapeur ionisant l'air. Cette émanation se dépose sur les corps, principalement sur les corps électrisés négativement, et les rend momentanément radioactifs. M. Rutherford prit, sur ce phénomène, de très intéressantes mesures.

En même temps, M. et M^{me} Curie découvraient que, sous l'influence du radium, les corps devenaient temporairement radioactifs. Ce n'est pas l'effet secondaire décrit plus haut, c'est un phénomène persistant, qui disparaît assez lentement à partir du moment où l'action du radium a cessé. M. Curie 240 a appelé ce phénomène 'la radioactivité induite,' et il en a fait une étude très complète ; il a reconnu que le phénomène se

produit avec une grande intensité dans un espace clos, que l'activité induite est la même sur tous les corps et indépendante de la pression à l'intérieur de l'enceinte, mais que l'activité ne se produit pas si l'on maintient constamment le vide en enlevant les gaz produits ; les solutions des sels de radium produisent le phénomène avec plus d'intensité que les sels solides. Les liquides, l'eau de cristallisation extraite des sels actifs, ou l'eau
250 séparée d'une solution active par une membrane semi-perméable en celluloïde, deviennent fortement radioactifs. Il en est de même des gaz. Ces corps, activés, produisent les mêmes effets que le radium ; ils émettent un rayonnement pénétrant qui traverse les enveloppes de verre qui les contiennent, et rend celles-ci lumineuses. L'activité induite se propage de proche en proche dans le gaz d'une enceinte fermée, même au travers de tubes capillaires et de fissures imperceptibles ; les corps s'activent d'autant plus que le volume de gaz qui est en regard de leur surface est plus considérable. Les corps phospho-
260 rescents deviennent lumineux en s'activant.

Dans un récent travail, MM. Elster et Geisel ont reconnu que l'air atmosphérique présente des propriétés analogues à celles des gaz activés, et ils ont pu recueillir, sur des fils électrisés négativement, des traces de produits radioactifs. La cause de cette radioactivité est un problème d'un haut intérêt.

Enfin, il est un mode remarquable d'induction qui est de nature à inspirer les plus grandes réserves dans les conclusions que l'on peut formuler relativement à la présence d'éléments nouveaux dans les préparations radioactives. Toute substance
270 inactive que l'on introduit dans une dissolution d'un sel d'uranium ou de radium, et que l'on sépare ensuite par précipitation, est devenue radioactive, et perd lentement cette radioactivité. Ce fait a d'abord été observé par M. Curie et par M. Giesel, qui a ainsi activé du bismuth. Avec l'uranium, une trace de baryum, précipitée à l'état de sulfate, devient notablement plus active que l'uranium ; le baryum ainsi activé n'émet, comme l'uranium, que des rayons déviables.

Après cette précipitation, le sel d'uranium, ramené à l'état solide, est moins actif qu'auparavant ; on peut même accentuer

cet affaiblissement par des opérations successives, mais les 280
produits reprennent, peu à peu, spontanément, leur activité
première.

L'affaiblissement temporaire de l'activité à la suite d'une dissolution est un fait général pour les sels d'uranium et de radium. Avec les sels d'actinium, M. Debierne a communiqué au baryum une activité très grande. Le baryum ainsi activé peut se séparer du baryum inactif; il se fractionne comme le chlorure de baryum radifère, les parties les plus actives étant les moins solubles dans l'eau et l'acide chlorhydrique. M.
Debierne a obtenu ainsi un produit mille fois plus actif que 290
l'uranium. Le baryum activé se comporte donc comme un faux radium, mais il diffère du radium véritable par l'absence de spectre et parce qu'il perd son activité avec le temps.

Parmi les préparations radioactives, un grand nombre pourraient être des corps activés. Tel est le cas du polonium, qui est vraisemblablement du bismuth activé.

L'uranium et le radium sont caractérisés par leur spectre d'émission, et par la stabilité de leur radioactivité. L'accroissement spontané que l'on observe sur les sels déposés des dissolutions pourrait trouver une explication dans un phénomène 300
d'auto-induction des molécules actives sur les molécules inactives qui leur sont associées.

L'origine de l'énergie rayonnée par les corps radioactifs est toujours une énigme. Dans l'hypothèse matérielle, il ne paraît pas invraisemblable d'assimiler le phénomène à l'évaporation d'un corps odorant, de comparer l'émanation à une sorte de gaz dont les molécules auraient des masses de l'ordre de grandeur de celles des ions électrolytiques, et d'identifier le rayonnement à des rayons cathodiques provenant de la dislocation de ces ions et donnant en même temps une émission de 310
rayons X. On imputerait ainsi la dépense d'énergie à la dissipation de la matière active. Bien que cette hypothèse rende à peu près compte de la plupart des faits, il n'existe aucune expérience précise qui lui donne une sanction.

Je ne puis m'étendre plus longuement sur ce sujet, dont j'ai résumé très incomplètement l'état actuel, en insistant sur la

partie physique, qui est plus spécialement de mon domaine, et bien que la partie chimique ait donné lieu à des travaux du plus haut intérêt.

320 Ces questions ont fait naître des aperçus nouveaux sur les transformations de la matière. En dehors des conditions exceptionnelles dans lesquelles elles permettent d'étudier les rayons cathodiques, elles ont soulevé et soulèvent chaque jour des problèmes nouveaux, dont le premier et le plus mystérieux est la spontanéité du rayonnement.

HENRY BECQUEREL,
de l'Académie des Sciences.

Le Radium, Janvier 1904.

LE RADIUM.

En 1895, le professeur Rœntgen découvrait les rayons X, qui permettaient à l'homme de voir à travers les corps opaques et d'analyser, à l'intérieur d'un corps plein de vie, le fonctionnement mystérieux des organes.

Une fois de plus, la science expérimentale avait fait, des rêves les plus fantastiques, une réalité tangible.

Quelques mois plus tard, la découverte des rayons Rœntgen en amenait une autre, plus étonnante encore. M. Henri Becquerel, de l'Institut, annonçait au monde savant que l'ura-
10 nium émettait une radiation invisible, douée des mêmes propriétés que les rayons X, mais avec cette différence qu'au lieu d'emprunter, comme les Rayons X, son énergie à une source extérieure, l'uranium émettait une radiation inépuisable, qu'il n'empruntait à aucune source visible.

Comme tout s'enchaîne dans la science, trois ans plus tard, M. et M^me^ Curie découvrent et isolent un corps nouveau, le radium, tiré de résidus d'où on a extrait l'uranium, et qui reproduit les mêmes phénomènes et d'autres encore, avec une intensité deux millions de fois plus grande !

20 Corps étrange mais infiniment rare, car, pour extraire un seul gramme de radium, il faut traiter plus de dix mille kilogrammes

de minerai. Aussi, à l'heure actuelle, un gramme de radium pur vaut-il près de 150,000 fr.

Le radium s'obtient sous forme de sel, chlorure ou bromure. Les sels de radium sont spontanément lumineux. Ils impressionnent les plaques photographiques à travers n'importe quel corps. On n'en connaît pas de tout à fait opaques aux rayons du radium; seulement l'impression sur la plaque sensible est plus ou moins rapide, suivant le milieu traversé.

A toutes les températures, le rayonnement du radium est égal 30 à lui-même. Il ne varie pas entre la température d'ébullition de l'hydrogène, 252 degrés *au-dessous* de zéro, et celle de l'eau bouillante, 100 degrés *au-dessus* de zéro.

Autre propriété singulière: les rayons du radium rendent bons conducteurs tous les corps réputés isolants de l'électricité, air gazeux, air liquide, pétrole, benzine, sulfure de carbone, etc.

Dans une pièce où l'on a manipulé pendant un certain temps des sels de radium, il devient impossible d'isoler électriquement un appareil.

Comme les rayons X, les rayons du radium ne peuvent ni se 40 réfléchir ni se réfracter. Ils traversent en ligne droite les miroirs et les prismes.

Ils sont décomposables cependant par l'aimant, qui les sépare en trois faisceaux distincts inégalement déviés, chargés d'électricité positive ou négative.

Les rayons négatifs sont assimilables à de vrais projectiles, animés d'une vitesse comparable à celle de la lumière—300,000 kilomètres par seconde—et dont la masse est *mille fois plus petite* que celle du plus petit atome connu: l'atome d'hydrogène. 50

Le radium est une source perpétuelle, indéfinie, et réputée, jusqu'à nouvel ordre, spontanée, d'électricité. Un tube de verre scellé, contenant un sel de radium, se charge d'électricité comme une bouteille de Leyde. Qu'on trace sur le verre un trait, au moyen d'une lime, l'enveloppe se perce, une étincelle jaillit: l'opérateur reçoit un choc.

Le radium est aussi une source perpétuelle et indéfinie de chaleur.

Ce corps, qui semble en contradiction avec les lois jusqu'ici
60 connues de la nature, réalise le MOUVEMENT PERPÉTUEL, dont la conception même paraissait absurde aux savants et aux philosophes.

Placez un thermomètre isolé à côté d'un tube de radium, ce thermomètre accusera une température supérieure de 3 ou 4 degrés à celle du milieu ambiant.

En outre, phénomène plus extraordinaire encore, un sel de radium en solution communique momentanément ses propriétés à tous les corps enfermés avec lui dans un même vase. C'est ce que M. Curie appelle la *radioactivité induite.*

70 Il semble donc que le radium émette une émanation matérielle qui se fixe sur les corps solides et se diffuse dans les gaz, à la manière d'une vapeur infiniment subtile. Mais cette émanation, contrairement aux rayons du radium, ne traverse pas les corps. Elle reste confinée dans le flacon qui l'enferme. La moindre paroi continue l'arrête. Seulement on peut la transvaser par un tube, même capillaire.

En distillant cette émanation, on la concentre dans un tout petit espace, à la condition de refroidir énergiquement cet espace, par exemple en le plongeant dans l'air liquide.

80 L'émanation du radium, aussitôt séparée du sel d'où elle est sortie, se dissipe spontanément, même dans un tube hermétiquement scellé. Elle diminue alors de moitié en quatre jours.

Tout, en somme, est étonnant et mystérieux dans ce corps. J'ai gardé pour la fin son action la plus suggestive, celle qu'il exerce sur les corps vivants.

Un sel de radium enfermé dans une boîte opaque, lorsqu'on l'approche de l'œil, la paupière fermée, provoque une vive sensation de lumière. Alors tous les milieux de l'œil deviennent
90 instantément phosphorescents. C'est l'œil lui-même qui éclaire la rétine.

L'épiderme, en contact avec une ampoule, n'éprouve aucune sensation. Mais si le contact se prolonge pendant plusieurs

jours, les tissus se désorganisent. Il se forme une escarre et une plaie qui ne se guérit qu'après des mois de traitement. On cherche à utiliser cette propriété pour le traitement du lupus et du cancer.

Projetés sur les centres nerveux, les rayons du radium provoquent la paralysie et la mort.

En ce moment, en collaboration avec M. le docteur Bordas, 100 j'étudie l'action physiologique de l'*émanation* du radium concentrée au maximum par le refroidissement dans l'air liquide. J'injecte dans le sang d'animaux des gaz et des liquides saturés de cette émanation concentrée. Ce sont des recherches difficiles appelées peut-être à d'immenses résultats.

J'en ai dit assez pour montrer que la découverte de ce corps ouvre un champ admirable à nos investigations et à nos espérances.

Les propriétés du radium bouleversent nos idées sur les forces et sur la matière. 110

Le radium dégage constamment de la lumière, de la chaleur, de l'électricité et une matière subtile, impondérable, qu'on peut transvaser, condenser. Il dissipe continuellement une quantité d'énergie considérable, en conservant le même état et le même poids.

Est-ce l'effet d'une transformation atomique continue? Est-ce la transformation sensible d'un rayonnement de l'espace encore inaccessible à nos sens?

Enfin, quelle est la mesure de cette énergie? Nous avons dit que la vitesse des particules émises par les rayons chargés 120 d'électricité négative égalait celle de la lumière—300,000 kilomètres par seconde. Réduisons-la hypothétiquement au tiers. Cette énergie, pour un seul gramme de radium, représente *plusieurs milliards de chevaux-vapeur.*

Sous forme de chaleur, le radium dégage un nombre de calories suffisant pour élever son propre poids à 34 kilomètres de hauteur, dans l'espace d'une heure. Ajoutez à l'énergie calorique l'énergie électrique et celle des autres rayonnements, et voyez quelle puissance indéfinie!

130 Le radium constitue l'énigme la plus troublante de ce siècle, pourtant si fécond en énigmes.

PROFESSEUR D'ARSONVAL,
Membre de l'Institut.

Le Radium, Janvier 1904.

DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE PAR LES PESÉES.

Solution de molybdate d'ammonium.—On dissout 100 grammes d'acide molybdique dans 240 grammes d'eau à 50° et 160 grammes d'ammoniaque de D=0,91. On filtre, on verse dans 1200 centimètres cubes d'acide nitrique de D=1,20; on agite, on laisse reposer 5 à 6 jours dans un endroit modérément chaud, puis on complète avec de l'eau de manière à faire 2 litres.

Solution magnésienne.—Dans 1700 centimètres cubes d'eau on dissout 110 grammes de sulfate de magnésium cristallisé et 10 140 grammes de chlorure d'ammonium, puis on ajoute 300 grammes d'ammoniaque de D=0,91.

RÉACTIF DE NESSLER POUR L'AMMONIAQUE.

On dissout 2 grammes d'iodure de potassium dans 5 centimètres cubes d'eau et on ajoute à chaud et par petites portions de l'iodure de mercure tant qu'il veut s'en dissoudre; on laisse refroidir, on ajoute 20 centimètres cubes d'eau, on laisse reposer, on filtre, et à 20 centimètres cubes du liquide on ajoute 30 centimètres cubes de lessive de soude préparée avec de la soude exempte de carbonate, fraîchement fondue et dissoute dans peu d'eau; si le liquide se trouble, on le filtre. Une trace d'am-20 moniaque produit un précipité jaune-brun.

M. Boussingault recherche l'ammoniaque dans les eaux, en distillant dans un ballon communiquant avec un serpentin, un litre d'eau additionné d'un peu de potasse, préalablement fondue; on recueille environ 400 centimètres cubes et on y dose l'ammoniaque par liqueur titrée.

M. Schloesing emploie pour le dosage un ballon dont le col est incliné, et qui est fermé par un bouchon traversé par l'extrémité d'un serpentin d'assez gros diamètre, en verre mince,

et ascendant ; l'air ambiant suffit pour opérer la condensation ; les vapeurs ammoniacales qui s'échappent sont condensées par 30 un petit réfrigérant de Liebig ; et l'eau alcaline produite s'écoule par un tube qui plonge dans 10 cc. d'acide sulfurique titré. On déplace l'ammoniaque par la magnésie, et on s'arrête après une heure et demie d'ébullition.

Analyse de la Bière

Densité.—La densité doit être déterminée à la température de 15°, avec un densimètre donnant directement le dix-millième.

Alcool.—L'alcool se dose par distillation comme dans les vins ; pour éviter la mousse, on agite préalablement le liquide dans un flacon rempli au tiers, et à plusieurs reprises, en ôtant ensuite le bouchon pour en expulser l'acide carbonique. 40 L'alcool recueilli doit rappeler l'odeur du moût et non celle du houblon. Lorsque la première odeur ne domine pas, on peut être certain que la bière a été faite avec du glucose. L'odeur du résidu aqueux offre aussi une grande importance pour mettre sur la voie de la falsification. L'alcoomètre doit indiquer le 10° de degré.

On ne peut se servir de l'ébullioscope pour déterminer l'alcool, les chiffres obtenus avec cet appareil étant trop élevés.

Il est pratiquement sans importance de neutraliser la bière avant la distillation, sauf pour les bières belges ; cette saturation 50 de la vinasse empêche de tirer les indications de l'odeur du produit distillé.

Extrait.—On évapore au bain-marie, vers 70°, 20 cc. de bière dans une capsule à fond plat, de manière à avoir une grande surface, et l'on dessèche le résidu jusqu'à poids constant. Si l'on ne prend pas la précaution d'opérer dans une capsule plate, il faut porter, à la fin de l'opération, la température de 110 à 115°, mais ce procédé est peu recommandable.

On peut aussi opérer ainsi qu'avec les vins, en admettant le terme de 8 heures comme suffisant. 60

On peut encore doser l'extrait de la manière suivante : on retranche de la densité de l'eau, soit 1000, la densité de l'alcool aqueux de même degré alcoolique que la bière examinée, et on

ajoute à ce chiffre la densité de la bière; la somme donne la densité de la bière privée d'alcool. Comme elle ne contient guère que du glucose et de la dextrine, on peut obtenir avec une table calculée à cet effet une approximation suffiisante de la teneur en extrait sec.

Extrait o/o	Densité.	Extrait o/o	Densité.
2 . . .	1,0080	10 . . .	1,0404
3 . . .	1,0120	11 . . .	1,0446
4 . . .	1,0160	12 . . .	1,0488
5 . . .	1,0200	13 . . .	1,0530
6 . . .	1,0240	14 . . .	1,0578
7 . . .	1,0281	15 . . .	1,0614
8 . . .	1,0322	16 . . .	1,0657
9 . . .	1,0363	17 . . .	1,0700

Densité des solutions de dextrine.

Dextrine o/o	Densité.	Dextrine o/o	Densité.
2,5 . . .	1,0097	15 . . .	1,0573
5 . . .	1,0194	17,5 . . .	1,0669
7,5 . . .	1,0288	20 . . .	1,0776
10 . . .	1,0383	22,5 . . .	1,0863
12,5 . . .	1,0479	25 . . .	1,0958

La bière doit renfermer au maximum 3% d'alcool en volume, et 35 gr. par litre d'extrait, donnant 1 gr. 5 de cendres. Au-dessous de ces limites, elle devra être vendue sous le nom de *petite bière* ou *boisson.*

Glucose, dextrine et matières albuminoïdes.—On évapore au bain-marie à consistance sirupeuse 10 cc. de bière; on délaie le sirop dans 2 à 3 cc. d'eau et on verse ce liquide dans 100 cc. d'alcool à 90% ; on lave le vase avec de l'alcool au même degré, et l'on filtre sur un filtre taré pendant que le précipité est encore floconneux.

On pèse le résidu séché, et on le divise en deux parts; la première est incinérée, et fournit le poids des sels insolubles dans l'alcool, c'est-à-dire de presque tous les sels de la bière; la deuxième est introduite dans un tube à combustion, et on y dose l'azote par les méthodes connues; ce poids sert à calculer la matière albuminoïde en se fondant sur ce que cette dernière

renferme 15,5% d'azote; en multipliant par conséquent le poids de l'azote obtenu par 6,5 (exactement 6,452), ou bien celui de l'ammoniaque par 5,3, suivant que l'on emploie le procédé de Dumas ou la chaux sodée, et ramenant le chiffre trouvé au poids du précipité total, on aura la quantité p. 100 de la matière albuminoïde; en retranchant ce poids et celui des cendres du poids du précipité on aura la quantité p. 100 des dextrines et des gommes. Les dextrines que renferme la bière sont peu étudiées; nous comprenons sous ce nom les corps intermédiaires entre l'amidon et le glucose, non dialysables, insolubles dans l'alcool, et dextrogyres; la coloration par l'iode est un caractère particulier de quelques-uns de ces corps. 100

La liqueur alcoolique dont il a été question plus haut est distillée, et le résidu additionné d'eau, puis évaporé pour chasser les dernières traces d'alcool; on redissout dans l'eau, de manière à faire 100 cc., et on dose le glucose dans le liquide coloré au moyen de la liqueur de Fehling, ou bien on décolore par le sous-acétate de plomb ou le noir animal et on dose le glucose au polarimètre. 110

Les bières renferment d'autant plus de matières albuminoïdes qu'elles sont plus jeunes. Les bières de garde contiennent à peu près parties égales de dextrine et de sucre; les bières fermentées complètement ne renferment plus que des traces de sucre. 120

On peut aussi doser le glucose par fermentation. 100 p. de glucose donnent en moyenne 50 p. d'alcool absolu. La dialyse sépare aussi le glucose de la dextrine; enfin on peut doser le glucose dans le résidu de la distillation de l'alcool, en décolorant et titrant par le Fehling.—Le glucose de la bière paraît être de la maltose.

Glycérine.—On évapore à sec dans le vide 300 cc. de bière et l'on malaxe le résidu avec de l'éther de pétrole. On ajoute de la baryte au résidu, on évapore de nouveau dans le vide et on épuise par un mélange de 200 cc. d'éther pur et anhydre et de 200 cc. d'alcool absolu; enfin on évapore la solution éthéro-alcoolique et on maintient le résidu pendant 24 heures sur l'anhydride phosphorique dans le vide; il est formé généralement de glycérine pure et peut être pesé directement. 130

Acides.—On fait bouillir 100 centimètres cubes de bière au réfrigérant ascendant pour chasser l'acide carbonique; on étend d'eau à 200 cent. cubes; et sur 100 centimètres cubes du liquide, on dose l'acidité totale en prenant comme indicateur la phtaléine du phénol ou l'acide rosolique. Les autres 100 centi-
140 mètres cubes sont évaporés, au bain-marie, à consistance sirupeuse en ajoutant ensuite de l'eau et répétant plusieurs fois l'opération pour chasser tout l'acide acétique; puis on redissout dans l'eau et on titre de nouveau; on a ainsi l'acide lactique et, par différence avec le premier chiffre, l'acide acétique.

On exprime généralement l'acidité en centimètres cubes de soude normale saturés par 100 cc. de bière.

Le rapport des acides fixes aux acides volatils est normalement de 30 à 1, sauf pour les bières belges. 100 gr. de bière exigent d'habitude 12 à 25 cc. d'alcali normal décime, soit 1,2,
150 à 2,5 d'alcali normal.

Acide carbonique.—Ce dosage peut se faire facilement par perte de poids. On place 250 cent. cubes de bière dans un ballon que l'on chauffe de 70° à 80°. Les gaz se dessèchent en passant sur du chlorure de calcium qui retient l'eau et l'alcool.

Cendres.—Il faut incinérer le résidu d'au moins 250 cc. de bière.

Acide phosphorique.—On le dose à l'urane par le procédé habituel, directement dans 100 cc. de bière. Sa proportion varie peu dans la bière normale; on en trouve par litre 0,5 gr. pour les petites bières, 0,6 à 0,8 pour les bières d'exportation,
160 0,8 à 0,9 pour le bockbier bavarois.

Alcalis.—Il est rare que l'on ait à se préoccuper de la proportion des alcalis; ce n'est que lorsqu'il s'agit de reconnaître les bières faites avec des succédanés de l'orge que l'on trouve ainsi quelques indications. Le dosage se fait par les procédés ordinaires de l'analyse quantitative.

Plusieurs bières anglaises renferment jusqu'à 0,7 gr. par litre de chlorure de sodium, provenant, paraît-il, des ingrédients employés.

Les dosages les plus importants sont ceux de l'alcool, de l'ex-
170 trait. des cendres, de l'acidité totale et de l'acide phosphorique.

Agenda du Chimiste, 1883.

III. PHYSIOLOGIE.

Revue Annuelle de physiologie.

Dans ma *Revue de physiologie* de l'année dernière, j'évaluais à plus d'un millier le nombre des mémoires qui paraissent chaque année sur les différentes branches de la physiologie. J'ai eu la curiosité de rechercher le degré d'exactitude de cette évaluation toute approximative. A cet effet, j'ai eu recours aux listes de publications énumérées chaque quinzaine, par catégories, dans le *Centralblatt für Physiologie.* J'ai laissé de côté les rubriques : *Physiologie générale*, *zoologie*, *botanique*, *physique*, *chimie*, *psychologie* et *reproduction*, parce que la plupart des travaux qui y sont mentionnés, ne se rapportent pas directement à la physiologie. 10
Je me suis borné à relever le total brut des mémoires sur la physiologie du sang, de la circulation, de la respiration, etc. . . ., et je suis arrivé aux résultats numériques suivants :

	Publications	
Physiologie générale des nerfs et des muscles	147	
— spéciale des mouvements	81	
— respiration	101	
— chaleur animale	42	
— sang et circulation	344	
— glandes	263	
— digestions et nutrition	206	20
— organes des sens	265	
— voix et parole	66	
— système nerveux	400	
— technique expérimentale	68	
Total	1,983	

Ce total comprend un assez grand nombre de travaux de

morphologie pure ou de pathologie, qui sortent par conséquent du cadre des études physiologiques. Je pense qu'il faut de ce chef le réduire d'un tiers ou tout au moins d'un bon quart. Il n'en reste pas moins un total fort respectable de 1,200 à 30 1,400 mémoires ou notices de physiologie pour la seule année 1890.

Les lecteurs de la *Revue* ne s'attendent certainement pas à ce que je lise à leur intention ces 1,200 à 1,400 publications écrites dans toutes les langues civilisées, pour leur en offrir la quintessence. Ce travail de bénédictin est d'ailleurs fait chaque année en Allemagne par plusieurs spécialistes qui se partagent la besogne: le résultat de leur labeur sera publié vers la fin de 1891 ou de 1892 en un ou deux gros volumes sous le titre de *Comptes rendus annuels des progrès de la physiologie pendant* 40 *l'année* 1890. Je renvoie les physiologistes de profession à ces excellentes publications.

Je me bornerai à traiter ici, un peu au hasard de la plume, quelques-unes des questions de physiologie qui sont à l'ordre du jour, ou auxquelles je me suis particulièrement intéressé dans ces derniers temps. Je ne donnerai aucune indication bibliographique: ceux qui désirent recourir aux sources, trouveront immédiatement ce qu'ils cherchent, dans la table des noms d'auteurs de l'année 1890 du *Centralblatt für Physiologie*, ou dans les relevés trimestriels du même recueil.

I.—*Sang, Lymphe, etc.*

50 Le sang, soustrait à l'organisme, se coagule, comme on sait, au bout de cinq à dix minutes, c'est-a-dire qu'il se transforme en une gelée cohérente. Il est facile de constater au microscope que la solidification du sang est due au dépôt de la *fibrine*, substance solide qui se concrète sous forme de filaments enchevêtrés, emprisonnant, entre les mailles du réseau, et les globules et la partie liquide du sang.

La fibrine qui se forme ainsi résulte de la transformation chimique d'une matière albuminoïde, *le fibrinogène*, primitivement dissoute dans le plasma sanguin. La transformation du

fibrinogène en fibrine est un phénomène de fermentation, dû à 60
l'intervention d'un ferment soluble (*ferment de la fibrine*) qui
prend naissance au moment où le sang s'épanche au dehors des
vaisseaux. On sait depuis longtemps que la fibrine contient
toujours une petite quantité de sels minéraux, notamment de
phosphates de calcium; mais on était généralement porté à
considérer ces éléments minéraux comme des impuretés. Dans
ces derniers temps, E. Freund (de Vienne) avait attaché une
grande importance à cette précipitation de phosphate calcique
et avait même pris ce fait comme base d'une théorie nouvelle de
la coagulation du sang, théorie destinée dans la pensée de son 70
auteur à détrôner la théorie classique de la fermentation. J'ai,
ici même, fait l'année dernière, la critique des idées de Freund
et relaté les expériences de Latschenberger et de Strauch qui
contredisent formellement sa théorie.

Dans une excellente thèse de doctorat, soutenue devant la
Faculté des Sciences de Paris, M. Arthus me paraît avoir placé
dans son vrai jour le rôle que les sels des métaux terreux et
alcalino-terreux jouent dans le phénomène de la coagulation du
sang. Arthus a montré que le calcium n'est pas un composant
accidentel du caillot sanguin, mais qu'il constitue un élément 80
normal et indispensable de la molécule de fibrine. La fibrine
est un composé calcique, et la transformation du fibrinogène en
fibrine, sous l'influence du ferment, suppose la présence d'un
sel de calcium disponible dans le liquide. Enlevez au sang le
calcium qu'il contient, et il suffit pour cela de l'additioner d'un
oxalate ou d'un fluorure alcalin (moins de 0,1 % d'oxalate, moins
et 0,2 % de fluorure), de manière à former un précipité d'oxalate
ou de fluorure calcique; du même coup vous supprimez la
coagulation spontanée. Le liquide sanguin privé ainsi de
calcium se coagulera au contraire spontanément, si vous lui 90
restituez le calcium (addition de quelques gouttes d'une solution
de chlorure de calcium), à condition, bien entendu, qu'il contienne
du fibrinogène et du ferment.

Les faits découverts par Arthus ne contredisent nullement la
théorie classique de la fermentation, telle qu'elle a été établie
principalement par les travaux d'Alexandre Schmidt et de Ham-

marsten. Mais ils impliquent une modification de cette théorie: outre le *fibrinogène* et le *ferment*, la production de la fibrine semble nécessiter encore la présence d'une *substance fibrino-*
100 *plastique*; cette substance fibrinoplastique n'est pas une *globuline*, comme l'avait admis Alex. Schmidt dans ces premiers travaux: c'est un sel de *calcium* ou de *strontium*.

Le *strontium* peut en effet remplacer le *calcium* dans ces expériences, et l'on obtient alors une fibrine strontique à la place de la fibrine calcique ordinaire. Il suffit de prendre du sang ou du plasma oxalaté, c'est-à-dire privé de calcium, et d'y ajouter une petite quantité d'un sel de strontium, qui, joint au ferment et au fibrinogène, amène la formation d'un coagulum de fibrine strontique.

110 Les sels de calcium interviennent d'ailleurs dans une autre coagulation, celle du lait. Hammarsten a démontré, il y a plusieurs années, que la formation du fromage ou caséum, c'est-à-dire la précipitation de la caséine du lait par le suc de la caillette (quatrième estomac du jeune veau), est, tout comme la coagulation du sang, un phénomène de fermentation. Il a donné le nom de *Labferment*, en français *ferment de la présure*, au ferment soluble qui préside à la précipitation de la caséine. Hammarsten a insisté sur les analogies nombreuses que présentent les deux phénomènes: coagulation du sang, caséification
120 du lait. Pagès et Arthus ont montré que le caséum est (comme la fibrine du sang) une combinaison calcique, et que la coagulation du lait (additionné du ferment de la présure) peut être suspendue ou rétablie par la précipitation des sels calciques du lait ou par leur restitution à ce liquide (Confirmation des travaux de Hammarsten).

Ici les sels de strontium, de baryum ou de magnésium peuvent remplacer ceux de calcium.

Les applications des faits découverts par Arthus concernant le rôle du calcium dans la coagulation du sang sont nom-
130 breuses et susceptibles de rendre des services importants aux physiologistes.

Dans toutes les recherches où l'on doit conserver du sang liquide, sans le défibriner, on pourra avec avantage substituer

aux procédés ordinaires plus ou moins compliqués, le procédé si simple à l'oxalate alcalin. Citons : les expériences de mesure de la pression sanguine, où le sang doit rester pendant longtemps fluide malgré son contact avec des corps étrangers, tels que le mercure ou les parois du manomètre. Citons encore les expériences de séparation des globules et du plasma sanguin, qui, jusqu'à présent, ne pouvaient être réalisées que par des 140 artifices délicats (refroidissement intense du sang, isolement d'un vaisseau emprunté à un animal de forte taille : la jugulaire du cheval), ou par des additions de quantités notables de substances étrangères (sulfate de magnésium, sulfate de sodium), altérant complètement la composition des liquides naturels. Enfin, peut-être sera-t-il possible de répéter les expériences de circulation artificielle, en injectant dans les organes que l'on veut soumettre à ce genre d'investigation, du sang complet, non défibriné, mais rendu incoagulable par addition d'un peu d'oxalate ou de fluorure. 150

La coagulation du lait sous l'influence du ferment de la présure, celle du sang par le ferment de la fibrine, a été étudiée récemment à un autre point de vue, par Fick, de Jager et J. Latschenberger.

Fick rappelle ce fait, connu depuis longtemps, qu'une goutte de solution de présure versée dans un grand volume de lait provoque, pour ainsi dire, instantanément la coagulation de la masse entière du lait. Il lui semble extrêmement peu probable que, dans cette opération, chaque molécule de caséine ait pu subir directement le contact d'une molécule de ferment de la 160 présure : n'est-il pas plus rationnel d'admettre que la précipitation de la caséine, commencée en un point par le contact direct de la présure, s'est ensuite propagée de molécule de caséine en molécule de caséine, et a envahi toute la masse, sans participation ultérieure de la présure ? L'ébranlement moléculaire imprimé par le ferment à la première molécule de caséine au moment de sa précipitation se serait ensuite transmis de proche en proche.

Fick a émis une opinion analogue au sujet de la coagulation du sang qui, elle aussi, une fois commencée dans une portion 170

du plasma, se propagerait sans participation ultérieure du ferment. Il a même établi une espèce d'opposition entre : 1° *les fermentations de coagulation*, dans lesquelles le processus de précipitation (coagulation du lait, coagulation du sang) mis en train par le ferment en un point du liquide, s'étend ensuite de lui-même avec une grande rapidité à toute la masse ; et 2° *les fermentations de dissolution* (diastase, pepsine, trypsine, etc.), qui ne se déroulent jamais instantanément, et où chaque molécule de corps fermentescible doit nécessairement subir le contact
180 du ferment.

De Jager a encore renchéri sur l'hypothèse de Fick. Non seulement l'action du ferment soluble peut se transmettre, sans contact direct, à travers la masse du liquide en fermentation, mais elle pourrait s'exercer à distance à travers des substances absolument inertes. Ainsi de la pepsine, conservée à l'intérieur d'un dialyseur, pourrait, sans diffuser au dehors, attaquer et dissoudre des flocons de fibrine placés dans de l'eau acidulée, à l'extérieur du dialyseur. Bien plus, un fragment de pancréas (tissu riche en ferment diastasique), suspendu à une petite
190 distance au-dessus d'une soucoupe remplie d'empois d'amidon, exercerait son action fluidifiante et saccharifiante sur cette substance, à travers la couche d'air qui sépare le pancréas de l'amidon.

Latschenberger croit que Fick dans ses expériences ne s'est pas suffisamment mis à l'abri de la diffusion possible des ferments à travers la masse du liquide coagulable. Latschenberger a répété les expériences de coagulation du sang ou du fibrinogène et celles du lait, en cherchant à éviter cette cause d'erreur. Il introduit dans une des branches (la plus large) d'un tube en U, une colonne de liquide coagulable (plasma
200 sanguin, lait, etc.) et dans l'autre branche (la plus étroite) une colonne de solution de ferment (ferment de la fibrine ou présure), en ayant soin d'éviter le mélange des deux liquides. Dans ces conditions, la coagulation ne se produit au début qu'au niveau de la petite surface de séparation des deux liquides : elle progresse ensuite fort lentement, mettant plusieurs heures à envahir une épaisseur de quelques millimètres de liquide. La diffusion du ferment dans la solution coagulable explique ici

suffisamment la coagulation, sans qu'il soit nécessaire de recourir à l'hypothèse de Fick.

Signalons parmi les travaux parus dans ces dernières années 210 sur la coagulation du sang, les intéressantes découvertes faites au laboratoire de physiologie de Leipzig par Lukjanow et Ch. Bohr. Ces expérimentateurs ont trouvé que le tissu pulmonaire exerce sur le sang, qui le traverse, une action anticoagulante des plus prononcées, tandis que les autres tissus du corps augmentent la coagulabilité du sang, et lui restituent ses propriétés plastiques, que son passage à travers le poumon tend à lui faire perdre. L'expérience la plus démonstrative et que j'ai eu l'occasion de répéter moi-même, consiste à supprimer complètement sur un chien vivant le cycle de la grande circulation, pour ne laisser au 220 sang d'autre trajet à parcourir que celui de la circulation pulmonaire et du cœur. Il faut, pour arriver à ce résultat, lier l'aorte et toutes les branches qui en partent, sauf une seule (une artère sous-clavière par exemple), lier autant que possible les veines qui ramènent le sang des différents organes à l'oreillette droite en épargnant un de ces vaisseux (une branche de la veine cave supérieure). On abouche la seule artère restée perméable avec la seule veine conservée, ce qui permet à l'ondée sanguine lancée par le ventricule gauche, de gagner directement l'oreillette droite, sans passer par les capillaires de la circulation générale, qui se 230 trouvent exclus du circuit. Le trajet que suit le sang est donc le suivant : ventricule gauche, aorte, une artère, une veine, veine cave supérieure, oreillette droite, ventricule droit, artère pulmonaire, capillaires pulmonaires, veines pulmonaires, oreillette gauche et ventricule gauche ; puis le même cycle recommence. Au bout de moins d'une heure de cette circulation restreinte, dans laquelle le sang n'est plus soumis qu'à l'influence unique du cœur et du poumon, ce liquide a perdu complètement sa coagulabilité. Le fibrinogène a-t-il disparu du sang ? Les sels de calcium y font-ils défaut, les éléments producteurs du ferment 240 sont-ils altérés, ou l'absence de coagulation tient-elle à l'introduction dans le sang d'une substance nouvelle qui empêche la réaction de se produire ? C'est ce que des recherches nouvelles ne tarderont sans doute pas à nous apprendre.

Quoi qu'il en soit, les expériences de Leipzig ont établi cet autre fait intéressant, c'est que le sang rendu incoagulable par son passage à travers le poumon, récupère la faculté de fournir de la fibrine, quand on lui permet à nouveau de traverser les capillaires de la circulation générale; d'après Bohr, le paren-
250 chyme des organes abdominaux jouerait le principal rôle dans le rétablissement de cette propriété du sang.

Nous sommes ainsi conduits à admettre qu'il y a dans l'organisme vivant une lutte incessante entre ces deux tendances antagonistes, l'une suspendant la coagulabilité du sang, et émanant du tissu pulmonaire, l'autre au contraire s'exerçant dans le sens de la coagulation et provenant des différents tissus du corps.

Les dernières recherches publiées par Alexandre Schmidt et par ses élèves sont précisément consacrées à l'étude chimique
260 des influences coagulantes ou anticoagulantes que les cellules vivantes exercent sur le plasma sanguin.

Schmidt a reconnu que les différentes formes de protoplasmes sont capables de produire le ferment de la fibrine,—mais qu'elles produisent également des substances anticoagulantes, auxquelles il a donné le nom de *Cytoglobines.* Nous attendrons la publication intégrale des recherches de Schmidt, avant d'en entreprendre ici l'exposé.

L'étude des propriétés chimiques des matières albuminoïdes, de leurs dérivés, de l'hémoglobine, etc., a donné lieu, comme
270 les années précédentes, à un nombre considérable de publications, dans le détail desquelles il n'est pas possible d'entrer ici. Signalons ce fait intéressant que d'Arsonval a réussi à photographier les spectres d'absorption de l'hémoglobine et des combinaisons de cette substance avec l'oxygène, l'oxyde de carbone, etc.

II.—*Circulation.*

Les mémorables travaux de Chauveau et Marey sur le rythme cardiaque, qui datent de 1863, ceux de Marey sur la circulation dans les artères ont depuis longtemps passé dans le domaine classique de la physiologie. Ces recherches cardiographiques et

sphygmographiques sont à la fois les premières en date et les 280 plus importantes : on peut dire qu'elles représentent encore aujourd'hui, sur ce sujet difficile, le dernier mot de la science. Cependant chaque année quelques-uns des résultats classiques de ces recherches sont remis en question ou attaqués directement par les uns et défendus au contraire par d'autres expérimentateurs. Fick, von Kries, v. Frey et Krehl ont affirmé que les ondulations secondaires du tracé artériel fourni par le sphygmographe, ou par les manomètres élastiques, étaient en partie d'origine périphérique et produites par réflexion. Hoorweg, Hürthle, etc. ont défendu la doctrine de Marey, qui fait naître 290 l'ondulation dicrote à l'origine du système artériel, et qui admet la propagation de cette ondulation, du cœur vers la périphérie.

Je ne puis que répéter ce que je disais l'an dernier. L'accord se fera le jour où les physiologistes dissidents se donneront la peine de répéter les expériences classiques de Chauveau et Marey, en se plaçant dans les mêmes conditions de réussite, c'est-à-dire en prenant comme sujet le cheval, qui se prête, bien mieux que l'homme ou le chien, aux recherches cardiographiques.

Martin a décrit un nouveau procédé pour prendre chez les animaux domestiques de grande taille (cheval, bœuf, etc.) le 300 tracé de la pulsation de l'aorte abdominale. Le sphygmographe à transmission est introduit par l'anus dans le gros intestin et appliqué à la main contre l'aorte.

Hürthle, Jacquet, Bernstein, Hermann, Fr. Frank, Roy, Potain ont fait connaître des perfectionnements ingénieux apportés à la construction des appareils enregistreurs.

Colson a étudié les effets de l'occlusion de l'aorte abdominale, et Slosse ceux de la ligature des artères abdominales. Slosse a constaté qu'après ligature des trois artères intestinales, chez le chien, le rein continue à fonctionner et à fournir une urine, à la 310 préparation de laquelle le foie complètement anémié ne peut plus coopérer. L'urine obtenue dans ces conditions est moins abondante qu'à l'état normal, et contient beaucoup moins d'urée et d'ammoniaque. On y trouve de l'albumine et de la propeptone.

Les chiens opérés meurent au bout de quelques heures, en

présentant des symptômes d'intoxication du système nerveux central, notamment des convulsions analogues à celles qui caractérisent l'empoisonnement par la strychnine. Ces convul-
320 sions ne se présentent pas, comme on sait, si, au lieu de lier les artères des organes abdominaux, on lie la veine porte.

Arthaud et Butte ont lié l'artère hépatique et constaté la disparition du glycogène hépatique à la suite de cette opération.

François Franck a continué ses intéressantes recherches sur la circulation veineuse.

L'année 1890 nous a apporté également un contingent nombreux de travaux se rapportant au fonctionnement des nerfs vaso-moteurs. Bornons-nous à signaler les recherches d'Arthaud et Butte et celles de Morat.

330 Arthaud et Butte ont montré que le nerf vague exerce une action vaso-constrictrice sur le rein. L'excitation de ce nerf, pratiquée en dessous du cœur, arrête la sécrétion rénale, et arrête l'écoulement du sang par la veine rénale, tout en augmentant la pression générale du sang artériel.

On sait que les nerfs sensitifs, centripètes, quittent la moelle épinière par la voie des racines postérieures, tandis que les nerfs moteurs, secrétoires, inhibiteurs, etc., en un mot tous les nerfs centrifuges, suivent la voie des racines antérieures. Cette donnée fondamentale dans l'étude du système nerveux a été
340 établie à la suite des travaux de Bell et de Magendie (*loi de Magendie*).

La seule exception à cette loi, signalée par Stricker (1876), concernait les nerfs vaso-dilatateurs qui, d'après lui, quitteraient la moelle par la voie des racines postérieures. Gärtner (1889) avait confirmé les résultats obtenus par Stricker. Morat a repris récemment cette question ; il a constaté que chez le chien, les nerfs vaso-dilatateurs du pénis sortent par les racines antérieures des premières et deuxièmes paires sacrées, et obéissent par conséquent à la loi de Magendie, contrairement à l'opinion de
350 Stricker.

III.—*Respiration.*

Le sang subit un double changement chimique, lors de son

passage à travers le poumon : la matière rouge des globules, l'hémoglobine, absorbe l'oxygène de l'air des alvéoles, oxygène nécessaire à la combustion organique ; et d'autre part, le sang se débarrasse de l'acide carbonique qu'il contient en excès, et qui provient de la combustion organique.

Ces deux phénomènes d'échange gazeux, absorption d'oxygène et exhalation d'acide carbonique, se font entre l'air des alvéoles d'une part et le sang des capillaires pulmonaires d'autre part, à travers une mince paroi membraneuse. La surface totale des 360 vésicules pulmonaires a été évaluée chez l'homme à 200 mètres carrés ; en admettant que les capillaires en occupent les trois quarts, cela donnerait une surface de 150 mètres carrés à la nappe sanguine qui se trouve en contact presque immédiat avec l'air, et qui se renouvelle constamment. L'épaisseur de cette nappe est fort petite : $0^{mm}008$ en moyenne (diamètre des capillaires pulmonaires). Les surfaces de contact entre le sang et l'air présentent donc dans le poumon un développement colossal, condition éminemment favorable à la diffusion gazeuse, et à l'établissement rapide d'un équilibre de tension entre les gaz 370 du sang et ceux de l'air des alvéoles.

L'air que nous respirons contient près de 21 % d'oxygène et seulement 3 à 4 dix-millièmes d'acide carbonique. La tension de l'oxygène à la pression barométrique ordinaire est donc de 21 % d'une atmosphère et celle de l'acide carbonique presque nulle, 0,03 à 0,04 % At. L'expérience directe a montré que le sang veineux qui arrive au poumon présentait une tension d'oxygène faible, ne dépassant guère 3 % d'une atmosphère, tandis que la tension de l'acide carbonique était comprise entre 3,81 % et 5,4 % d'une atmosphère. Les lois de la diffusion 380 exigent que l'air des alvéoles pulmonaires cède de son oxygène au sang, tant que l'équilibre de tension n'est pas atteint ; et que réciproquement le sang veineux cède de son acide carbonique à l'air du poumon. Les échanges gazeux dont le poumon est le siège semblent donc pouvoir s'expliquer en quantité et en qualité par un simple phénomène de diffusion physique : diffusion dans laquelle la mince membrane qui sépare l'air et le sang jouerait un rôle purement passif. Telle est la doctrine classique,

que l'on se plaisait à considérer comme établie sur des bases 390 inébranlables.

Pour Bohr, la respiration pulmonaire n'est pas un phénomène physique simple, réductible à un échange, par diffusion physique, de gaz séparés par une membrane inerte, et présentant des tensions différentes sur les deux faces de la membrane. Bohr a repris les expériences dans lesquelles ses prédécesseurs, principalement Pflüher et ses élèves, avaient déterminé la tension de l'oxygène et celle de l'acide carbonique dans le sang artériel et dans le sang veineux, et est arrivé à des résultats numériques très différents. Il a trouvé la tension de CO^2 nulle ou presque 400 nulle dans le sang : aucune raison physique tirée de la diffusion ne peut donc expliquer l'exhalation de ce gaz au niveau des alvéoles pulmonaires.

Et quant à l'oxygène, dans plusieurs de ses expériences le sang arteriel, c'est-à-dire le sang qui revient du poumon, lui a présenté une tension de ce gaz supérieure à celle qui règne dans l'air des alvéoles. Ici aussi, la diffusion seule est incapable d'expliquer complètement l'absorption d'oxygène.

Pour Bohr, le tissu pulmonaire, c'est-à-dire la paroi de la vésicule qui sépare le sang et l'air dans l'acte de la respiration, 410 n'est pas la membrane inerte admise jusqu'à présent par les physiologistes. Les cellules qui tapissent la surface interne des alvéoles interviennent activement pour décomposer les combinaisons de l'acide carbonique du sang, et pour rejeter le gaz carbonique du côté de l'atmosphère des vésicules. Ces éléments histologiques président pareillement à l'absorption de l'oxygène. Le poumon deviendrait ainsi l'analogue physiologique des autres glandes du corps, dont il est d'ailleurs l'analogue au point de vue anatomique et embryogénique.

Les recherches de Bohr tendent également à révolutionner 420 toutes les notions classiques sur l'état dans lequel se trouvent l'oxygène et l'acide carbonique du sang. Bohr admet l'existence de quatre combinaisons différentes de l'oxygène avec la matière rouge du sang ou hémoglobine : Une oxyhémoglobine α, une β, une γ et une δ, absorbant respectivement 0,4, 0,8, 1,7 et 2,7 centimètres cubes d'oxygène par gramme. Il y aurait de même

une série de combinaisons de l'hémoglobine avec l'acide carbonique :

Carbo-hémoglobine	β	absorbant	1,5	centim. cube de	CO^2,
—	γ	—	3	—	—
—	δ	—	6	—	—

430

Il existe, dans l'organisme, d'autres surfaces comparables à celles du poumon, formées également d'un revêtement de cellules plates que l'on avait toujours considérées comme constituant des membranes inertes, laissant indifféremment passer les liquides et les gaz en vertu des lois de la diffusion. Citons la surface interne des vaisseaux capillaires, à travers laquelle une partie du plasma sanguin filtre constamment pour former la lymphe. La lymphe est encore, pour la plupart des physiologistes, un simple liquide de transudation physique, formé sous l'influence de la pression sanguine. J'ai relaté ici l'année 440 dernière les expériences de Heidenhain, qui tendent au contraire à faire considérer la lymphe comme un produit de sécrétion des parois des capillaires. Les cellules des parois des capillaires font, parmi les substances contenues dans le sang, une véritable sélection, laissant passer les unes pour en former la lymphe, et retenant plus ou moins les autres.

Les branchies des animaux aquatiques nous présentent également un système de membranes séparant le sang de l'animal, de l'eau de mer extérieure. C'est à travers ces membranes, que se font les échanges gazeux de la respiration : absorption de 450 l'oxygène de l'eau, et rejet au dehors de l'acide carbonique du sang. J'ai fait l'année dernière sur la branchie des poissons de mer quelques expériences qui m'ont conduit à des résultats curieux. J'ai constaté que la membrane branchiale n'est pas non plus une cloison poreuse inerte ; elle laisse passer les gaz *oxygène* et *acide carbonique*, qui servent aux échanges respiratoires ; mais elle arrête les sels de l'eau de mer : elle fait donc un véritable choix parmi les substances dissoutes dans le milieu extérieur.

L'eau dans laquelle vivaient les poissons sur lesquels j'ai 460 expérimenté contenait près de 4 % de sels solubles (eau de la

Méditerranée, prise à Banyuls-sur-Mer), tandis que leur sang n'en contenait que 18 $^{\circ\circ}/_{\circ\circ}$. L'équilibre salin entre le sang et l'eau était donc loin d'être atteint. Cet équilibre, au contraire, s'établit rapidement si l'on remplace la membrane branchiale vivante par une membrane de papier parchemin. Pour réaliser cette condition expérimentale, il suffit de placer le sang dans un boyau de papier parchemin faisant office de dialyseur, et de suspendre le tout dans un gobelet contenant de l'eau de mer. 470 Les sels de l'eau de mer diffusent vers le sang, jusqu'à ce que l'équilibre osmotique soit établi.

Le placenta, ce gâteau vasculaire qui sert d'intermédiaire physiologique entre la mère et l'enfant, pendant la vie intra-utérine, nous présente également des cloisons membraneuses séparant le sang de la mère de celui du fœtus. Les expériences de Zuntz et de Krukenberg nous avaient déjà appris que les sels contenus dans le sang maternel ne passent pas indifférem-ment dans le sang du fœtus. E. Wertheimer et Meyer ont décrit deux cas d'intoxication mortelle par l'aniline et la tolui-480 dine observés chez des chiennes pleines. Dans les deux cas, la substance toxique existait en quantité notable dans le sang de la mère, mais n'avait pas passé dans le sang des fœtus qui n'en contenait pas trace.

L'année 1890 nous a fourni plusieurs travaux de valeur concernant l'innervation des centres respiratoires.

Les physiologistes ne sont pas d'accord sur la cause à laquelle il faut attribuer la production des premiers mouvements respiratoires chez le fœtus des mammifères au moment de la naissance. Les uns, adoptant les idées de Preyer, admettent que l'activité 490 des centres nerveux respiratoires est mise en jeu par voie réflexe, au moment de la naissance. Le point de départ devrait donc être cherché à la périphérie : la vive irritation des nerfs sensibles de la peau, due au froid extérieur, et au contact des corps étrangers, se transmettrait aux centres et provoquerait leur excitation.

Mais la plupart des physiologistes expliquent, avec Schwartz et Rosenthal, la production des premiers mouvements respiratoires par un mécanisme tout différent. Il s'agirait d'une action

directe du sang fœtal sur les cellules nerveuses des centres respiratoires. Dès que le jeune mammifère est né, les condi- 500 tions de l'hématose changent complètement. La consommation de l'oxygène et la production de l'acide carbonique éprouvent brusquement une augmentation colossale, par suite des mouvements musculaires: en même temps le renouvellement des échanges gazeux n'a plus lieu dans le placenta maternel, par suite de l'arrêt de circulation qui s'y produit. Ce réservoir d'oxygène n'est donc pas accessible au sang de l'enfant. Ce sang acquiert en peu de temps un degré de vénosité suffisant pour exciter les centres respiratoires et provoquer leur intervention active. 510

Les expériences récentes d'Engström montrent que chez des fœtus de cobayes et de lapins encore contenus dans leurs membranes, et suffisamment protégés contre le froid et contre toute cause d'irritation des nerfs cutanés, la simple interruption de la circulation placentaire suffit pour provoquer des mouvements respiratoires. L'excitation des nerfs cutanés n'est pas indispensable à l'établissment de ces mouvements; mais elle constitue un puissant adjuvant de leur production, comme le savent les accoucheurs.

Sandmam, François-Franck ont fait des expériences sur les 520 conditions dans lesquelles se produit la contraction des muscles bronchiques: excitation du pneumogastrique, irritation de l'endocarde ou de la surface interne de l'aorte.

IV.—*Chaleur Animale.*

Plusieurs physiologistes ont constaté que, chez l'homme et les animaux à sang chaud, la valeur des combustions interstitielles (mesurée par l'importance de l'absorption d'oxygène et de l'exhalation d'acide carbonique qui s'effectuent dans les poumons) présente un minimum, lorsque la température extérieure est voisine de + 18° à + 20°. Dès que cette température s'abaisse, les combustions interstitielles augmentent d'intensité; 530 il en est de même si la température extérieure dépasse notablement + 20°. Rosenthal et Ansiaux ont constaté la même relation entre les variations de la température du milieu extérieur

et la quantité de chaleur produite par les animaux à sang chaud ; ils ont eu recours à la méthode calorimétrique directe, si facile à appliquer grâce au calorimètre à air imaginé par d'Arsonval. La quantité de chaleur cédée au calorimètre par les lapins et les cobayes est au minimum pour une température extérieure voisine de + 20.° Elle augmente dès que la température extérieure
540 s'éloigne notablement en plus ou en moins de cette température moyenne de + 20°. Il y a donc accord complet entre les résultats fournis par la méthode calorimétrique directe, et par les méthodes indirectes qui déduisent la production de chaleur de la consommation de l'oxygène.

Ce résultat facile à prévoir demandait cependant à être vérifié expérimentalement, attendu que plusieurs physiologistes, notamment Ch. Richet et ses élèves, étaient arrivés dans leurs expériences à ce résultat paradoxal, que l'augmentation ou l'abaissement de la température extérieure agit différemment sur
550 la consommation d'oxygène et sur le rayonnement calorifique des animaux homéothermes. Le minimum des échanges respiratoires correspond pour eux au maximum de la radiation thermique.

Ch. Richet a continué ses recherches sur l'influence que la taille, ou plus exactement la surface de refroidissement, c'est-à-dire l'étendue du tégument cutané, exerce sur la thermogénèse. Il y a proportionnalité rigoureuse entre ces deux grandeurs. Toutes choses égales d'ailleurs, l'exhalation de l'acide carbonique est proportionnelle à l'étendue de la surface cutanée (0^{gr}. 0027,
560 par centimètre carré de surface et par heure).

D'Arsonval a perfectionné ses appareils calorimétriques. Berthelot et André ont déterminé les chaleurs de combustion des principaux composés azotés contenus dans les êtres vivants.

M. Kochs a émis récemment une théorie nouvelle de l'acclimatement de l'homme et des animaux domestiques dans les pays chauds. Les animaux à sang chaud, dit-il, ne peuvent résister aux températures élevées des régions tropicales, que par une diminution notable de la valeur de leurs combustions interstitielles. Cette diminution elle-même est obtenue, grâce à
570 un changement dans la composition centésimale de la substance

de nos tissus : la proportion de substance active diminue considérablement par rapport à la proportion d'eau, c'est-à-dire de substance indifférente. Tandis que dans les climats tempérés, la proportion centésimale d'eau contenue dans les muscles de l'homme et des ruminants varie de 72 à 75 %, cette proportion s'élèverait à plus de 80% chez les individus vivant dans les pays chauds. Dans cette théorie, l'Européen qui se transporte dans un pays à température élevée serait acclimaté lorsque ses tissus ont acquis cette proportion élevée d'eau. Ce changement de composition chimique serait cause de la diminution de l'activité 580 musculaire et intellectuelle.

V.—*Digestion et Nutrition.*

Nous ne pouvons citer ici tous les travaux de détails parus depuis l'année dernière sur la sécrétion des sucs digestifs. Mentionnons cependant les recherches de Wertheimer sur la sécrétion salivaire. D'après Wertheimer le ganglion sous-maxillaire peut jouer réellement le rôle d'un centre nerveux réflexe, pour la sécrétion de la salive dans la glande sous-maxillaire, comme l'avait admis Claude Bernard. Schiff avait contesté le fait.

Arloing a montré que le grand sympathique cervical contient 590 chez le bœuf et la chèvre des filets excito- et fréno-sécrétoires destinés aux glandes du mufle et à la glande lacrymale. Moussu a déterminé les nerfs excito-sécrétoires des glandes parotides chez le bœuf, le mouton, le cheval et le porc, et a montré que ces nerfs partent de la racine motrice du trijumeau, et non du facial comme on l'admettait jusqu'à présent.

Dastre a continué ses études sur la sécrétion biliaire et indiqué un procédé qui permet l'établissement d'une fistule permanente de la vésicule biliaire chez le chien.

Un grand nombre d'expérimentateurs ont continué à prendre 600 la fonction glycogénique du foie comme sujet de leurs investigations. Je me propose d'analyser ici dans une autre occasion les principaux travaux parus sur cette importante question depuis quelques années.

VI.—*Physiologie des Muscles.*

Depuis quelques années, l'emploi de l'électromètre capillaire de Lippmann tend à se généraliser pour l'étude des phénomènes électriques présentés par les nerfs et les muscles. Comme on le sait, cet instrument révèle l'existence des courants électriques et de leurs variations, par des déplacements microscopiques d'une
610 colonne de mercure contenue dans un tube de verre capillaire. La masse de mercure mise en mouvement dans le capillaire est si minime, qu'on peut entièrement faire abstraction de l'influence de l'inertie : les déplacements de la surface libre du mercure sont capables de suivre, sans temps perdu appréciable, les variations les plus rapides et les plus compliquées dans l'intensité d'un courant électrique.

Les boussoles et les galvanomètres employés couramment jusqu'à présent en électrophysiologie, présentaient sous ce rapport un grave défaut, dû à l'inertie de la masse métallique de
620 l'aimant que le courant électrique avait à ébranler et à mettre en mouvement. Ces instruments étaient incapables de suivre des variations tant soit peu rapides de l'état électrique d'un nerf ou d'un muscle ; et les physiologistes avaient dû, pour ces études, imaginer des méthodes fort compliquées (*Rhéotome* de Bernstein).

L'emploi de l'électromètre, combiné avec l'inscription photographique des excursions du ménisque mercuriel de l'instrument, a permis de résoudre quelques-unes des questions d'électrophysiologie que les anciennes méthodes avaient laissées in-
630 décises. On ne connaissait pas la relation exacte de temps, qui existe dans la contraction musculaire, entre le début du phénomène mécanique de raccourcissement et celui du phénomène électrique connu sous le nom de *variation négative*. On admettait assez généralement que le phenomène électrique précède le début de la contraction, et se développe par conséquent pendant la période dite *latente* de la contraction, c'est-à-dire pendant l'intervalle fort court (quelques millièmes de seconde) qui sépare le moment de l'excitation de celui du début du raccourcissement musculaire. Burdon-Sanderson à réussi à

photographier sur la même plaque sensible le tracé du signal 640
d'excitation du muscle, celui de la contraction musculaire ainsi
que celui de l'électromètre capillaire. La vitesse de translation
de la plaque était contrôlée par l'inscription photographique des
vibrations d'un diapason. Burdon-Sanderson a constaté, au
moyen de cette méthode élégante, que la variation électrique et
la contraction mécanique du muscle débutent exactement en
même temps, environ deux centièmes et demi de seconde
($=\frac{1}{400}$) après le moment de l'excitation. Les deux phénomènes
présentent donc un retard ou temps perdu identique.

Gad et Heymans ont étudié l'influence que la température 650
exerce sur la contraction musculaire. Leur travail a été
couronné par l'Académie des Sciences de Paris.

La contraction du muscle triceps fémoral, qui se produit chez
l'homme ou chez les animaux quand on percute le tendon
rotulien, est considéré par les physiologistes et les pathologistes
comme un phénomène réflexe, nécessitant par conséquent
l'intervention de nerfs sensibles, de centres nerveux spinaux et
de nerfs moteurs. A. D. Waller combat cette explication
classique, en se basant principalement sur la faible durée (moins
d'un centième de seconde, selon lui) du temps perdu, c'est-à-dire 660
du temps qui s'écoule entre le moment de l'excitation mécanique,
par choc du tendon, et le début de la contraction musculaire.
La contraction serait, d'après lui, produite par excitation mé-
canique directe du muscle. Le temps perdu correspondant aux
réflexes les plus simples comporte toujours, comme on le sait, un
minimum de plusieurs centièmes de seconde.

Deux des maîtres de la Physiologie, Chauveau et Marey, nous
ont donné chacun un ouvrage capital sur la physiologie du
mouvement, le *Vol des Oiseaux* (Marey) et la *Contraction muscu-
laire* (Chauveau). 670

Zuntz a récemment repris une question intéressante, celle de
la comparaison du muscle vivant avec les machines à vapeur ou
à gaz, au point de vue de l'utilisation de l'énergie chimique et de
sa transformation en énergie mécanique. Les meilleures
machines à gaz n'utilisent, d'après Schotte, que 7,33% de la
chaleur de combustion du charbon; et dans les machines à gaz

on ne recueille sous forme de travail que 10, 82% de l'énergie calorifique du gaz brûlé.

Les expériences de Zuntz, Lehmann et Hagemann faites sur le
680 cheval, celles de Katzenstein, Gärtner, etc., faites chez l'homme, ont montré que le moteur vivant utilise jusqu'à 35% de l'énergie de combustion des aliments, et la fait apparaître sous forme de travail extérieur. Le moteur vivant est donc, sous ce rapport, très supérieur à la machine à feu. Les moteurs électriques alimentés par des piles présenteraient seuls un rapport encore plus favorable entre l'énergie chimique dépensée dans la pile et le travail extérieur fourni par le moteur.

Mais il ne faut pas oublier que si la chaleur rayonnée par une machine à gaz peut légitimement être considérée comme un
690 déchet, il n'en est plus de même pour l'animal à sang chaud envisagé comme moteur. La chaleur produit dans les muscles, concurremment au travail, est aussi utile, aussi nécessaire à l'organisme que ce dernier. La portion d'énergie chimique des aliments qui se convertit en chaleur doit être rangée dans la colonne des profits, et non dans celle des pertes, lorsque l'on dresse le bilan de l'organisme.

Voici quelques chiffres intéressants cités par Zuntz: 1000 kilogrammètres de travail pendant l'ascension (déplacement vertical) correspond à la combustion de 1^{gr}, 665 de chair muscu-
700 laire, ou 0^{gr},7151 de graisse, ou 1^{gr},6315 de fécule ou 1^{gr},6846 de sucre, c'est-à-dire à la mise en liberté de 2857, 1 kilogrammètres d'énergie chimique, dont 1857, 1 sont transformés en chaleur (4,3695 calories). Chez l'homme, 1,000 mètres de déplacement horizontal correspondent par kilogramme de poids à la combustion de 0^{gr},12704 de chair musculaire (0^{gr},05457 de graisse, ou 0^{gr},12471 de fécule, ou 0^{gr},12854 de sucre).

En ce qui concerne la physiologie spéciale des mouvements, la mécanique du larynx et celle de la phonation ont fait l'objet de plusieurs travaux intéressants. Les recherches de Hermann
710 et de Pipping sur le timbre des voyelles se rattachent au même sujet.

VII.—*Système Nerveux.*

Les expérimentateurs avaient jusqu'à présent deux procédés d'investigation à leur disposition dans l'étude des localisations cérébrales : 1° l'extirpation de la portion du cerveau dont on veut déterminer la fonction, extirpation suivie d'une suppression ou d'une altération profonde de la fonction ; 2° l'excitation directe, électrique ou chimique, de la substance nerveuse, excitation qui, pour certaines régions déterminées de la substance cérébrale, donne lieu à des mouvements limités à un petit nombre de muscles, soit du membre antérieur, soit du membre 720 postérieur, soit d'une autre portion du corps.

C'est ainsi que la destruction d'une partie déterminée de la surface du cerveau, dans la région occipitale droite du singe, abolit la vision dans la moitié droite de chaque rétine. L'animal opéré ne voit plus rien dans toute la moitié gauche du champ visuel. Au-devant de cette région *psycho-optique* de l'écorce cérébrale, il y a une région dite *psycho-motrice*, dont l'excitation électrique provoque des mouvements des muscles de l'œil. On a pareillement déterminé à la surface du cerveau des régions *psycho-acoustique*, *psycho-olfactive*, etc. 730

Beck a imaginé un troisième procédé appelé à compléter et à contrôler les résultats fournis par les deux premières méthodes dans l'étude fonctionnelle de la topographie cérébrale.

Ce procédé utilise la variation électrique négative, comme signe révélateur de l'activité de telle ou telle portion de l'écorce cérébrale, survenant à la suite d'une excitation sensorielle appliquée à la périphérie.

Ceci demande un mot d'explication : du Bois-Reymond a montré que les nerfs, les muscles et les éléments vivants en général, lorsqu'ils sont excités et qu'ils passent de l'état de repos 740 à l'état d'activité, sont le siège d'un phénomène électrique spécial auquel il a donné le nom de *variation négative.*

D'après Hermann, la variation négative consisterait en ceci, que la portion irritée de substance vivante devient négative par rapport aux portions voisines restées au repos. Sciecznow, Gotch et Horsley ont montré récemment (1888-1889) que les

centres nerveux, notamment la moelle allongée et la moelle
épinière, présentent (comme les nerfs et les muscles) le phéno-
mène de la variation négative quand on les excite. C'est ce fait
750 que Beck a utilisé pour l'étude topographique du cerveau.

Supposons qu'il s'agisse de déterminer la situation du centre
psycho-optique. On appliquera deux électrodes impolarisables
sur deux points symétriques de la surface du cerveau et on les
reliera à un galvanomètre très sensible. On n'observera aucune
déviation ou une déviation insignifiante de l'aimant tant que
l'animal est au repos. A ce moment on fera tomber une vive
lumière sur un endroit déterminé de l'une des rétines de
l'animal : si l'une des électrodes appliquée à la surface du
cerveau touche le centre psycho-optique correspondant, on en
760 sera immédiatement averti par le développement d'un courant
électrique et d'une déviation de l'aimant indiquant que cette
électrode est électrisée négativement. S'il n'y a pas de déviation
de l'aimant, cela indiquera que les électrodes ne sont pas à la
bonne place : il s'agit alors de trouver cette place par tâtonne-
ments, en déplaçant les électrodes, jusqu'à ce que la déviation se
produise au moment où l'œil droit est excité par la lumière. En
excitant ensuite la portion symétrique de l'œil gauche, on
obtiendra une déviation semblable de l'aimant, mais dans l'autre
sens.

770 Ces faits ont été pleinement confirmés par Fleischl v. Marxow
qui avait fait des expériences analogues en 1883 et en avait
consigné les résultats dans un billet cacheté déposé à l'Académie
des Sciences de Vienne. La publication du travail de Beck l'a
déterminé à rompre le silence.

Fleischl a constaté en outre que l'anesthésie par le chloro-
forme supprime complètement les manifestations électriques
dans les centres nerveux, au moment de l'excitation de la rétine
ou des nerfs sensibles. Cette observation peut servir jusqu'à un
certain point à résoudre la question suivante : La suppression de
780 la douleur est-elle réelle dans l'anesthésie chloroformique ; ou,
y a-t-il seulement, après le réveil, suppression du souvenir de
la douleur perçue réellement malgré l'anesthésie ? Puisque le
chloroforme supprime la manifestation matérielle (variation

électrique) du phénomène psychique de la sensibilité, il est probable que le phénomène psychique fait lui aussi défaut pendant l'anesthésie.

Peut-être les faits signalés par Beck, par Fleischl, par Gotch et Horsley mettront-ils fin à la controverse qui se poursuit depuis plusieurs années entre les partisans et les adversaires de la doctrine des centres corticaux psycho-moteurs et psycho-sen- 790
sibles. Signalons parmi les travaux parus l'année dernière sur ce sujet, les expériences de Brown-Séquard, les recherches de Munk, Mott, Schaefer, Obregia, Gilman Thompson et Sanger-Brown sur les centres corticaux de la vision, celles de H. Krause sur le centre cortical des mouvements du larynx, celles de Mott et Schaefer sur l'excitation du corps calleux, celles de v. Korànyi sur la destruction du corps calleux, de Flechsig sur les fonctions acoustiques des tubercules quadrijumeaux inférieurs, etc.

« Un chapitre très intéressant de la physiologie du bulbe est 800
celui de l'influence qu'exercent les uns sur les autres la plupart des centres nerveux groupés dans cet organe. L'activité de l'un d'entre eux retentit pour ainsi dire forcément sur celle du centre voisin, et souvent le phénomène ainsi provoqué par irradiation ne paraît être d'aucune utilité pour l'acte auquel il s'associe.» (Wertheimer.) C'est ainsi que, chez le chien, chaque mouvement d'inspiration s'accompagne d'une accélération des pulsations cardiaques et d'une dilatation des petits vaisseaux. Il s'agit d'une association d'action des centres nerveux respiratoire, modérateur du cœur et vaso-constricteur, situés, 810
comme on sait, dans la moelle allongée et très voisins les uns des autres.

Par un mécanisme semblable, les mouvements de déglutition peuvent, eux aussi, modifier le rythme de la respiration et celui du cœur. D'après Meltzer (1883), chaque mouvement de déglutition s'accompagne chez l'homme d'une accélération passagère des battements du cœur et d'un arrêt de la respiration. Cette accélération est suivie d'une période ultérieure de ralentissement du rythme cardiaque.

Wertheimer et Meyer ont constaté que chez le chien, au con- 820

traire, les mouvements de déglutition s'accompagnent d'un ralentissement ou même d'un arrêt complet du cœur.

Le ralentissement du cœur doit son origine à l'association fonctionnelle de trois centres bulbaires impliqués dans le phénomène. Le centre de la déglutition, au moment où il entre en action, exerce une influence d'arrêt sur le centre de la respiration, et l'inhibition respiratoire a elle-même comme conséquence un renforcement d'activité de l'appareil modérateur du cœur.

A. Charpentier a poursuivi ses intéressantes recherches sur la
830 comparaison des sensations visuelles et auditives au point de vue de la durée et de l'intensité d'action de l'agent excitant.

On sait que les animaux empoisonnés par la naphtaline présentent des altérations du cristallin amenant une véritable cataracte. P. Kolinski a montré récemment que la naphtaline agit non seulement sur les yeux, mais en même temps aussi sur les organes internes. Les lésions anatomiques provoquées par la naphtaline dans divers organes peuvent être ramenées principalement à des changements dans le système vasculaire. Quant à la cataracte, elle est d'origine secondaire et due aux lésions de la
840 choroïde, de la rétine et du corps vitré.

Léon Frédericq,
Professeur de Physiologie à l'Université de Liége.

Revue Générale des Sciences,
30 *Octobre* 1891.

LES ANESTHÉSIQUES.

Mécanisme de l'Action des Anesthésiques.

Les anesthésiques généraux entravent, suspendent ou suppriment une fonction fondamentale, dont le libre exercice est indispensable à l'entretien des mouvements moléculaires intimes, qui caractérisent toute substance vivante, quelle que soit d'ailleurs sa forme ou son origine. Si l'on place, comme le fait Claude Bernard, des graines sur du coton humide, sous une cloche renfermant des vapeurs d'éther ou de chloroforme, à une

température égale à celle qui favoriserait la germination dans les conditions ordinaires, elles resteront à l'état de vie latente tant qu'elles seront en présence de l'agent anesthésique ; mais dès qu'elles auront été soustraites à son influence paralysante les phénomènes de germination commenceront et suivront leur marche régulière. Pour qu'une graine germe normalement il lui faut : 1° de l'eau, 2° de l'oxygène, 3e une température convenable. On peut s'assurer par l'expérience que ce n'est pas l'action de la chaleur qui est modifiée, ni celle de l'oxygène qui est suspendue par la présence de l'agent anesthésique, le phénomène de la respiration continuant au sein du protoplasma alors même qu'il est déjà anesthésié. On est en droit de se demander alors si ce n'est pas l'absorption et la fixation de l'eau qui est en cause. L'imbibition ou mieux l'hydratation est la condition initiale de la reprise d'activité des phénomènes vitaux dans la graine qui va germer, et la respiration ne se ranime que lorsqu'elle a été satisfaite. Le rôle de l'eau est donc dans la graine plus important que celui de l'oxygène ; on pourrait en dire autant d'ailleurs pour tous les êtres vivants. Qu'il s'agisse d'une graine ou d'une spore microscopique, l'oxygène et la chaleur seront impuissants à la faire germer ou développer sans le concours de l'eau, et la dessiccation produira le même effet que la vapeur anesthésique. Seulement, étant anesthésiée, elle pourra rester inerte même en présence de l'eau, dans l'état de vie latente. On a pu conserver ainsi pendant longtemps des végétaux inférieurs dans l'eau légèrement chloroformée : ils ne reprenaient leur vitalité que lorsque le chloroforme s'était complètement éliminé du liquide par évaporation. L'activité des nombreux ferments figurés peut être de même suspendue par les anesthésiques généraux ; sous l'influence de l'éther, du chloroforme, de l'alcool et d'autres composés chimiques analogues, les globules de la levûre de bière, par exemple, tombent dans une sorte de vie latente, même en présence d'une surabondance de matière fermentescible ou nutritive. C'est pour cette raison que les anesthésiques généraux sont souvent considérés comme des antiseptiques. L'alcool ordinaire, comme le chloroforme est un antiseptique ; il est aussi un anesthésique puissant quand

il est introduit dans l'organisme en quantité suffisante et le mécanisme de l'intoxication est dans les deux cas absolument comparable.

Beaucoup de composés organiques sont doués de cette action stupéfiante sur les êtres vivants, quel que soit le degré qu'ils 50 occupent dans la série végétale ou animale, et c'est à ces poisons que l'on doit réserver exclusivement le nom d'*anesthésiques généraux*.

I.

Bien qu'ils soient loin d'appartenir tous au même groupe chimique et qu'ils soient au contraire représentés par des types très différents au point de vue de leur composition et de leur structure moléculaire (alcools, éthers simples ou composés, aldéhydes, composés chlorés de carbures d'hydrogène, carbures d'hydrogène, etc.), les anesthésiques généraux n'en possèdent pas moins un ensemble de propriétés organoleptiques et 60 physiques communes qui leur donnent comme un air de famille. Ils sont incolores et odorants, possèdent une saveur piquante et produisent lorsqu'on les applique sur les muqueuses une sensation de chaleur plus ou moins brûlante. Ce sont des liquides mobiles, volatils, doués en général d'une tension de vapeur d'autant plus grande et d'une solubilité dans l'eau d'autant moindre qu'ils sont plus anesthésiques. Ils sont dysosmotiques, c'est-à-dire qu'ils traversent difficilement les membranes organiques ; leur chaleur spécifique est très inférieure à celle de l'eau, et généralement d'autant moins élevée qu'ils sont 70 plus actifs. Mais aucune de leurs propriétés n'est aussi caractéristique que l'action qu'ils exercent, tous sans distinction, outre leur pouvoir anesthésique, sur le protoplasma animal ou végétal. Si l'on suspend dans un vase *bien bouché*, au-dessus de ces liquides volatils, un fragment d'un parenchyme végétal dense, c'est-à-dire pauvre en lacunes aérifères et en vaisseaux aériens, comme celui d'une feuille de cactus, on ne tardera pas à voir sourdre à sa surface de nombreuses gouttes de rosée qui iront en grossissant de plus en plus jusqu'à ce qu'elles tombent au fond du liquide occupant la partie inférieure du récipient.

L'expérience peut être rendue très saisissante en plaçant sous 80 une cloche fortement suiffée et *bien adhérente* à son support un pied d'*Echéveria*, petite Crassulacée commune dans nos jardins, à côté d'une capsule remplie d'éther. Au bout d'une heure, quelquefois plus tôt, si la température ambiante est voisine de 20°, les feuilles de la petite plante se montrent toutes chargées de grosses gouttes de rosée; leur couleur est devenue plus foncée et leurs feuilles, dressées au début de l'expérience, ont pris l'attitude penchée qu'affectent certaines plantes sommeillantes pendant la nuit. Si on les pèse après les avoir essuyées, on constate que leur poids a notablement diminué et qu'une 90 petite quantité d'éther est venue prendre la place de la masse d'eau chassée au travers de l'épiderme des feuilles, malgré la résistance assez forte offerte par celui-ci.

Lorsqu'au lieu de végétaux denses on emploie des végétaux riches en trachées ou en lacunes aériennes, le phénomène peut passer inaperçu, parce que dans ce cas l'eau chassée du protoplasma des cellules ne s'écoule pas à l'extérieur: la teinte particulière que prennent les parties vertes rappelle alors celle des feuilles gelées et indique seule parfois le changement qui s'est opéré dans leur profondeur. 100

Ces vapeurs anesthésiques provoquent d'ailleurs des modifications intimes des tissus tout à fait comparables à celles qui résultent de l'action de la gelée. Il suffit pour s'en assurer de placer dans un vase bien bouché des oranges au-dessus d'une couche d'éther ou de chloroforme. Les vapeurs anesthésiques traverseront l'épicarpe et l'endocarpe pour aller se substituer à l'eau du protoplasma contenue dans les poils charnus de l'endocarpe. Cette eau devenue libre entraîne avec elle divers produits immédiats, entre autres l'acide citrique et va se déverser dans tous les interstices en donnant à l'orange l'apparence 110 complète d'un fruit dégelé.

On pourrait multiplier les exemples qui démontrent que les anesthésiques agissent comme la congélation sur les tissus en les déshydratant.

On sait que la congélation est souvent utilisée pour produire chez l'homme l'anesthésie localisée.

Les effets physiologiques du froid et des anesthésiques sont de même ordre, puisqu'ils permettent d'obtenir également l'antisepsie temporaire, la vie latente, l'anesthésie, et qu'ils consistent 120 principalement dans une déshydratation des tissus.

La comparaison peut être poussée plus loin encore. Tout le monde sait que lorsqu'on ébranle mécaniquement un pied de sensitive (*Mimosa pudica*) les pétioles s'abaissent et les folioles se ferment. Cet effet ne peut se produire qu'à la condition que les grosses cellules parenchymateuses qui forment les renflements placés à la base des folioles et des pétioles se flétrissent et ce phénomène ne peut s'effectuer que par le déplacement de l'eau qui gorge leur protoplasma. Or le froid et les anesthésiques produisent le même résultat. On a dit que les vapeurs anes-130 thésiques faisaient perdre à la sensitive sa sensibilité. C'est là une interprétation erronée. Les mouvements de la sensitive provoqués par le choc ne sont pas dûs à quelque chose de comparable à la sensibilité neurale, mais bien à un phénomène ayant les plus grandes analogies avec ceux de l'irritabilité musculaire ou de la contractilité. L'abaissement du pétiole produit par l'influence du choc, du froid ou des vapeurs anesthésiques est un phénomène *actif* résultant de la rétraction des cellules parenchymateuses qui perdent momentanément l'eau de constitution de leur protoplasma. Des expériences que j'ai 140 faites dans le courant de l'automne dernier sur les fruits du *Memordica elaterium*, petite Cucurbitacée commune dans le Midi de la France, prouvent que l'on peut provoquer chez certains végétaux d'autres phénomènes manifestement actifs par l'action de l'ébranlement, du froid ou des anesthésiques. Lorsque le fruit du *Memordica elaterium* approche de la maturité complète, un léger coup frappé à sa surface suffit pour mettre en jeu l'élasticité de son enveloppe qui projette au loin, en se contractant, une fusée liquide renfermant les semences.

Mais on peu cueillir facilement ces fruits un peu avant le 150 moment de la déhiscence naturelle et les conserver pendant plusieurs jours à l'air libre sans que celle-ci se produise spontanément. Au contraire si on les introduit dans un flacon *bien bouché*, renfermant des fragments de papier imbibé de chloro-

forme, d'éther ou de benzine, on provoque très rapidement la déhiscence. L'introduction de ces mêmes fruits à l'interieur d'un tube plongé dans un mélange réfrigérant donnera lieu au même phénomène. Or, si l'on pratique une coupe transversale sur ces fruits, on constate que parmi les trois couches qui composent leur enveloppe, la couche médiane présente un aspect différent selon que la déhiscence ne s'est pas produite 160 ou bien qu'elle a eu lieu. Dans le premier cas la couche moyenne, composée de grandes cellules gorgées de sucs, est restée transparente ; tandis que dans le second ces cellules sont remplacées par des lacunes aérifères qui donnent à toute l'épaisseur de cette couche un aspect blanc mat caractéristique. On doit donc admettre dans l'exemple que nous citons qu'il y a encore eu *mouvement provoqué par la déshydratation d'un protoplasma sous l'influence d'un agent anesthésique.*

II.

Mais il ne faudrait pas penser que ces phénomènes de déshydratation par les anesthésiques puissent être mis en évidence 170 seulement chez les végétaux. Si, au lieu du tissu parenchymateux d'un cactus, on suspend au-dessus d'une couche d'éther ou de tout autre anesthésique, dans un flacon *bien bouché*, un fragment de muscle, les vapeurs de ce liquide pénétreront le protoplasma et s'y fixeront en éliminant ici encore une certaine quantité d'eau à l'état liquide. Il en sera de même pour beaucoup d'autres tissus animaux.

Lorsque l'on substitue à ces fragments de tissus des œufs frais, l'affinité des anesthésiques pour les matières colloïdales qu'ils renferment pourra être assez grande pour que l'eau soit 180 chassée de l'œuf par une véritable transsudation au travers de la coquille, qui, dans certain cas, se couvre de goutelettes, comme les feuilles d'*Echéveria*. Cette dernière expérience donne lieu à une remarque particulièrement intéressante, à savoir que *la majeure partie des vapeurs anesthésiques traverse le blanc ou l'albumine de l'œuf pour aller se condenser dans le jaune ou vitellus, comme ferait une substance colorante ayant plus d'affinité pour le*

noyau de la cellule que pour son protoplasma. Or le vitellus de l'œuf se rapproche davantage par sa composition chimique du
190 tissu nerveux que l'albumine, et il est possible que l'élection particulière des anesthésiques généraux pour le système nerveux chez l'animal vivant ne reconnaisse pas d'autre cause. Cette élection n'est pas absolue et l'action des anesthésiques généraux sur ces manifestations physiologiques des tissus animaux vivants, quelle que soit d'ailleurs leur nature, a été mise hors de doute. Les vapeurs d'éther, de chloroforme suspendent les mouvements rythmiques de la pointe du muscle cardiaque de la tortue, des cils vibratils des cellules épithéliales, des spermatozoïdes; elles arrêtent temporairement les mouvements des globules blancs du
200 sang, des amœbes, etc.

Mais lorsqu'il s'agit de démontrer chez l'animal vivant et surtout chez l'homme que leur action est due à un véritable phénomène de déshydratation protoplasmique, on éprouve de sérieuses difficultés. On sait bien que la dessiccation entraîne chez beaucoup d'animaux, comme chez un grand nombre de végétaux, pendant l'hibernation, par exemple, l'état de vie latente: les anguillules du blé niellé, les rotifères sont des types d'animaux réviviscents. J'ajouterai même que des expériences récentes m'ont démontré que l'on pouvait également provoquer par la
210 sécheresse l'état de vie latente sur des animaux plus élevés en organisation.

Claude Bernard d'ailleurs avait déjà montré que si l'on plonge la patte d'une grenouille dans une solution de sel marin concentrée, on lui fait perdre assez rapidement la sensibilité en enlevant au sang une certaine quantité d'eau par exosmose. Dans ces conditions, l'action déshydratante est assez énergique pour que les milieux réfringents de l'œil perdent leur transparence par la production d'une opacité cristallinienne, c'est-à-dire d'une véritable cataracte. C'est aussi par l'observation de
220 certains phénomènes qui prennent naissance du côté des milieux optiques de l'œil que l'on peut constater la diffusion de l'action déshydratante des anesthésiques généraux sur les animaux supérieurs.

J'ai eu souvent l'occasion d'observer, dans les anesthésies

profondes et prolongées chez l'homme et chez le chien, que la
cornée perdait une partie de son poli. En examinant ces
cornées à l'aide d'un disque kératoscopique muni d'une loupe de
Brücke, je n'ai pas eu de peine à reconnaître que cette modifica-
tion morphologique, qui disparaît au réveil, était due à l'affais-
sement irrégulier du tissu cornéen d'où il résulte un véritable 230
astigmatisme irrégulier.

Lorsque j'annonçai ce fait, qui cependant avait été vérifié par
M. Javal et d'autres observateurs, on parut quelque peu surpris
que le chloroforme pût agir sur les milieux de l'œil et principale-
ment sur la cornée, parce qu'il fallait admettre qu'une certaine
quantité de ce liquide pouvait s'accumuler dans l'humeur
aqueuse. La réalité de ce fait est mise hors de doute aujourd'hui
par la constatation que j'ai eu l'occasion de faire récemment en
poursuivant l'étude de l'action physiologique des mélanges titrés
des composés chlorés de l'éthane. Si l'on fait pénétrer dans 240
l'organisme d'un chien par inhalation du chlorure d'éthylène ou
huile des Hollandais, de façon à déterminer une anesthésie de
trois quarts d'heure environ, on trouve le lendemain les deux
cornées de l'animal opacifiées.

Cette opacité est le résultat d'un véritable œdème cornéen
produit par la pénétration, de l'humeur aqueuse dans les lames
cornéennes. Si l'on s'était borné à cette simple constatation, on
aurait pu en conclure que, loin de déshydrater la cornée, le
chlorure d'éthylène avait la faculté de faciliter son imbibition
par l'humeur aqueuse. En réalité le mécanisme de cette lésion 250
est plus complexe. Chez le chien les lames cornéennes ne sont
protégées contre l'action opacifiante du liquide de la chambre
antérieure de l'œil que par une simple couche de cellules
épithéliales. La couche élastique anhiste de la membrane de
Descemet qui la renforce chez l'homme, le chat et d'autres
animaux, fait défaut chez le chien. Quand le chlorure d'éthylène
pénètre dans la chambre anterieure, après avoir été introduit
dans la circulation par inhalation ou par injection hypodermique,
ou bien parce qu'il y aura été injecté directement, les cellules
de la couche épithéliale se rétractent en laissant entre elles des 260
espaces par où pénètre l'humeur aqueuse. Celle-ci ne gonfle

d'ailleurs les fibres des lames cornéennes que lorsque le liquide de la chambre antérieure a été dépouillé, ainsi que l'animal, de l'agent anesthésique. On peut très facilement se rendre compte du mécanisme de cette lésion en opérant *in vitro* sur une cornée détachée de l'œil d'un chien.

Lorsque cette couche épithéliale est doublée d'une membrane anhyste élastique, on peut provoquer alors, chez le chat par exemple, des anesthésies prolongées par le chlorure d'éthylène
270 sans voir survenir d'opacité cornéenne. C'est pour la même raison que l'on n'a pas observé d'accidents du côté de l'œil chez l'homme dans les anesthésies pratiquées avec la liqueur des Hollandais. L'altération primitive résulte donc en définitive d'une déshydratation des éléments épithéliaux de la face interne de la cornée par un anesthésique général.

Les hypersécrétions salivaires et stomacales qui accompagnent le début de l'anesthésie, la soif, la sécheresse de la bouche que l'ivresse anesthésique laisse après elle, comme l'ivresse alcoolique, sont autant de motifs pour penser que d'autres tissus
280 subissent la même altération que les éléments anatomiques de la cornée.

D'autre part, le phénomène de déshydratation du protoplasme entraîne avec lui des modifications d'un autre ordre. En même temps que l'eau, divers principes immédiats s'éliminent et particulièrement des cristalloïdes, qui ne préexistent pas à l'état libre dans le protoplasme et résultent de dédoublements provoqués par la déshydratation. C'est par un effet de ce genre que l'hémoglobine sous l'influence de l'éther ou du chloroforme abandonne le globule rouge dans lequel elle était à l'état de
290 combinaison intime avec les principes colloïdaux, pour aller cristalliser à l'état de liberté dans un milieu liquide, où cependant elle n'est pas soluble. Il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que dans ce cas encore le froid peut produire les mêmes effets que les anesthésiques généraux.

Ces phénomènes, comme d'ailleurs tous ceux qui se passent au sein des protoplasmes appartiennent à la *mécanique vitale* ou *biologique*, c'ést-à-dire à la physiologie, et ne sont explicables ni par les lois ordinaires de la chimie, ni par celles de la physique.

On ne devra donc pas les considérer comme des phénomènes *physico-chimiques*, mais bien comme *actes physiologiques*. 300

III.

Mécanisme de l'anesthésie générale dans un organisme différencié. —Au fur et à mesure que le jeu des fonctions se perfectionne, le protoplasme ou sarcode se différencie et les éléments anatomiques qui résultent de cette différenciation prennent une constitution particulière en rapport avec le rôle spécial qui leur est assigné par la loi de division du travail ou du perfectionnement physiologique. Mais, à côté des propriétés spéciales à l'élément différencié, subsistent les propriétés générales qui caractérisent toute substance vivante : la fibre nerveuse ne se contracte pas comme le fait la fibre musculaire ; mais toutes 310 deux respirent et se nourrissent. Or, on conçoit aisément que si les fonctions générales sont entravées ou supprimées, les fonctions spéciales seront atteintes en même temps.

On a vu comment les anesthésiques généraux arrêtaient le fonctionnement de la substance vivante des êtres les plus divers. Nous allons examiner maintenant comment ils se comportent dans un organisme différencié.

Tous les anesthésiques généraux introduits d'une manière convenable dans l'organisme humain y produisent un ensemble de modifications qui, par leur marche et par leur nature, 320 présentent le tableau complet de l'ivresse alcoolique, qui peut servir de type dans ce genre d'intoxication. Leur activité est variable avec leurs propriétés générales qui sont plus ou moins accentuées ; mais on peut dire que tous donnent la même *note fondamentale*.

Ils peuvent même dans certains cas se comporter les uns vis-à-vis des autres comme de véritables succédanés. Si l'on prive brusquement un alcoolique de son poison habituel, on voit survenir des accidents dont l'ensemble constitue ce que l'on a appelé le *delirium tremens*. Ces accidents entièrement différents, 330 je dirai même absolument opposés à ceux de l'alcoolisme aigu, disparaissent rapidement quand on rend à l'organisme sa ration

de poison ordinaire. Mais on peut obtenir le même résultat en substituant à l'alcool toute autre liqueur enivrante, ou mieux encore, si l'on veut agir vite, un véritable anesthésique, tel que l'éther ou le chloroforme. D'autre part les sujets *mithridatés*, c'est-à-dire habitués à supporter des doses considérables d'alcool, exigent pour être endormis des quantités beaucoup plus fortes de chloroforme ou d'éther. On pourrait, en étudiant attentive-
340 ment ces effets mixtes, dresser pour les anesthésiques généraux, comme pour les autres poisons d'ailleurs, une table de ce que j'ai appelé les *équivalents toxiques*.

L'emploie d'un mélange titré de chloroforme et d'air à 8 ou 10 % respiré d'un manière continue permet de suivre facilement les diverses phases de l'ivresse anesthésique. Il n'en sera pas de même si l'on ne respecte pas cette condition fondamentale du déterminisme expérimental. J'ai montré (*loc. cit.*) comment la marche de l'empoisonnement chloroformique pouvait varier d'une seconde à l'autre avec le titre du mélange et c'est ce qui
350 explique pourquoi, avant Paul Bert, les expérimentateurs qui s'étaient placés dans des conditions défavorables et forcément variables n'ont pu obtenir de résultats rigoureusement comparables.

Dans l'anesthésie chloroformique continue l'activité des phénomènes de thermogénèse diminue de plus en plus et le corps tout entier se refroidit progressivement, comme dans le sommeil des animaux hibernants. Dans certaines anesthésies prolongées j'ai vu la température centrale du chien s'abaisser de 38° centigrades à 28° et l'animal revenir cependant à la vie
360 malgré cet énorme refroidissement. En même temps l'expérience montre que l'activité de la nutrition est ralentie; les échanges respiratoires sont moins actifs et le sang artériel, riche en oxygène au début, tend à se charger de plus en plus d'acide carbonique, tandis que ce déchet de la nutrition diminue dans le sang veineux qui traverse le poumon et par conséquent dans l'air expiré dans un temps donné. Dans le système vasculaire la pression s'abaisse au point de n'atteindre plus dans le sommeil confirmé que le tiers de sa valeur primitive.

Tous les troubles observés ne peuvent s'expliquer par l'empoi-

sonnement exclusif du système nerveux bien qu'il soit primitive- 370
ment atteint et avec une violence qui paraît être en rapport avec son importance physiologique. Si les désordres nutritifs sont en partie le résultat des troubles nerveux que provoque l'agent anesthésique, à son tour l'organisme entier, dont la nutrition est entravée, réagira sur le système nerveux et le cerveau restera inerte, sans idées, sans conscience ni volonté, tant qu'il ne recevra pas sous une pression normale le sang qui entretient dans l'état de veille son activité.

Par son action propre sur tous les tissus, par son activité particulière vis-à-vis du système nerveux et par tous les troubles 380
secondaires qui en résultent, on voit sous l'influence de l'anesthésique général succomber successivement toutes les manifestations physiologiques depuis les plus élevées jusqu'aux plus humbles.

IV.

Le premier effet de l'ivresse chloroformique sur nos manifestations cérébrales est de faire tomber le voile qui cache notre véritable personnalité, d'où il semble résulter que les facultés supérieures sont ordinairement employées à dissimuler le fond de la pensée ou la nature véritable du caractère. Celui-ci est-il gai, on le verra rire ou chanter dès le début de l'anesthésie. Cet 390
autre est-il violent, il menacera, s'agitera, frappera.

Un peu plus tard les idées commencent à se dissocier : le cerveau peut encore à ce moment comprendre un ordre et l'exécuter, mais bientôt à cette phase succède celle des erreurs de jugement et c'est la fin de l'intelligence.

Dans cette période nouvelle les sensations sont encore perçues, l'homme sent, il voit, il entend, mais il interprète mal ce qu'il ressent. Passe-t-on, par exemple, une éponge mouillée sur la peau, il croit que l'opération commence, pousse des cris de douleur ou cherche à se défendre. Certains observateurs ont cru 400
à tort qu'il s'agissait dans ce cas d'une véritable hyperanesthésie, alors qu'il n'y a en réalité qu'une illusion. C'est dans cette période surtout, si l'on veut éviter l'agitation du patient, qu'il

importe de le laisser dans le repos le plus absolu. Aux illusions viennent s'ajouter de véritables hallucinations ; on entendra le son des cloches, par exemple ; à ce moment la mémoire veille encore, car le souvenir de cette sensation peut persister même après un long sommeil.

Le désordre dans les idées va en s'accentuant de plus en plus
410 et se traduit par celui de la parole, des gestes et des mouvements ; puis de désordonnés qu'ils étaient les mouvements deviennent incoordonnés : c'est après le cerveau, le cervelet qui est atteint, puis le bulbe. Les modifications qui se produisent du côté de ce centre pour être moins profondes, n'en sont pas moins évidentes ; le rythme cardiaque et respiratoire est modifié, mais la respiration continue automatique et régulière, si aucun réflexe ne vient troubler son jeu inconscient.

Le rôle de l'encéphale est maintenant effacé : c'est la nuit qui tombe et le sommeil qui commence et si le patient peut encore
420 suivre machinalement des yeux une lumière que l'on promène, la conscience et la volonté ne participent plus à cet acte qui paraît être purement réflexe.

Le cerveau cessant d'ordonner, les membres restent dans l'inaction, tant qu'une excitation extérieure ne vient pas frapper les terminaisons sensitives.

A ce moment la moelle veille encore et si la sensibilité à la douleur est *depuis longtemps* déjà atténuée, *parce qu'elle a son siège dans l'encéphale*, la sensibilité tactile est au contraire conservée. Sa persistance est mise en évidence par les mouvements
430 réflexes que l'on peut encore provoquer par les excitations périphériques.

Il est certain que dans cette période les propriétés physiologiques des racines postérieures et antérieures de la moelle, la conductibilité des nerfs et la sensibilité des terminaisons tactiles ne sont pas atteintes et que les centres réflexes fonctionnent encore.

La sensibilité tactile à son tour va disparaître et avec elle les mouvements réflexes.

L'envahissement progressif, qui jusqu'alors avait marché de
440 haut en bas, va suivre une marche inverse et l'activité nerveuse

se limite de plus en plus à la région bulbaire et au système nerveux sympathique.

La sensibilité tactile disparaît d'abord dans le domaine des nerfs médullaires (tronc et membres), puis dans celui de la protubérance et du mésencéphale (face) et lorsque l'opérateur peut toucher la conjonctive de l'œil sans provoquer la fermeture réflexe des paupières, il ne reste plus que quelques réflexes obscurs et l'insensibilité peut être considérée comme complète au point de vue chirurgical. Pour obtenir l'inertie absolue, il ne reste plus qu'un obstacle à renverser : c'est la tonicité 450 musculaire ; ce pas est vite fait et l'anesthésique continuant sa marche envahissante plonge le corps entier dans la *résolution musculaire.*

La vie de relation est éteinte : seule la vie végétative subsiste, surveillée par le bulbe encore actif et par le système nerveux sympathique encore intact.

Tant que persiste cet état, le retour à la vie survient spontanément par la suppression de l'inhalation du mélange titré.

Mais si l'anesthésie est prolongée au delà du temps pendant lequel le bulbe peut résister, la mort survient par arrêt de la 460 respiration, puis du cœur *qui est toujours, dans l'intoxication graduelle par le chloroforme, l'ultimum moriens,* comme dans la mort naturelle. Tous ces phénomènes peuvent être groupés en trois périodes :

1° Période d'excitation des chirurgiens, qu'il serait préférable d'appeler *période d'agitation ;*

2° Période d'anesthésie confirmée ou de sommeil ;

3° Période ultime ou syncopale.

Chacune de ces trois périodes est caractérisée par un état particulier de la pupille et d'une manière si nette que l'on 470 pourrait dire, dans l'anesthésie par les mélanges titrés, que l'œil est à la fois le miroir du corps et celui de l'âme.

Au début de l'inhalation la pupille se dilate légèrement, mais il suffit d'en approcher une lumière pour provoquer immédiatement son resserrement (réflexe rétinien).

Dans la seconde période la pupille est contractée et le réflexe rétinien a disparu.

Enfin la troisième période s'annonce par une dilatation brusque avec absence de réflexe rétinien: c'est le signe certain d'une
480 menace de mort ou d'une syncope respiratoire imminente.

A ces trois phases il convient d'ajouter celle du réveil pendant laquelle la pupille d'abord fortement contractée se dilate lentement, avec réapparition de réflexe rétinien. Le patient rentre alors successivement en possession de ses facultés, qu'il récupère en général dans le même ordre qu'il les a perdues.

Les phénomènes consécutifs sont très analogues à ceux de l'ivresse alcoolique, mais ils se dissipent plus vite: le vomissement pituitaire se présente dans l'une et l'autre de ces deux intoxications: mais dans l'anesthésie chloroformique régulière
490 par les mélanges titrés, il doit toujours être considéré comme un phénomène de réveil brusque: il manque le plus souvent quand on laisse le patient se réveiller lentement en abaissant le titre du mélange.

Le chloroforme n'est pas décomposé dans l'économie: il s'élimine progressivement par les voies respiratoires dès que cesse l'inhalation.

D'une manière générale son action physiologique se rapproche plutôt de celle des agents physiques que de celle des agents chimiques.

V.

500 Si l'on cherche dans les phénomènes physico-chimiques connus quelque chose de comparable aux faits que nous avons exposés dans la première partie de cet article, c'est seulement dans les curieuses études de Graham sur les matières colloïdales minérales que l'on pourra trouver quelques analogies sans qu'il y ait pourtant identité à proprement parler.

Graham a donné le nom d'*hydrogèles* à des substances colloïdales que l'on obtient en fixant de l'eau sur l'albumine ou la silice. En immergeant un hydrogèle dans l'alcool, ce liquide peut se substituer à l'eau de constitution de l'hydrogèle sans que
510 le composé perde sa consistance gélatineuse; on obtient ainsi un *alcoogèle*. A son tour l'alcool pourra être chassé par l'éther

de la même manière et cette nouvelle opération donnera naissance à un *étherogèle*.

Mais ce qu'il y a de particulièrement remarquable dans les expériences de Graham, c'est que l'alcoogèle pourra être inversement transformé en hydrogèle, s'il est mis en présence d'une *masse* d'eau suffisante.

Dans le réveil du sujet anesthésié il semble se passer quelque chose d'analogue à cette transformation, que le savant physicien anglais n'a pu expliquer que par une 'action de masse.' 520

Dès que l'inhalation chloroformique est suspendue, l'agent anesthésique dissous dans le sang s'élimine par le poumon. Le sang, débarrassé de sa présence, enlève à son tour aux éléments anatomiques le chloroforme fixé par le protoplasma, qui récupère ses qualités premières, sans qu'à aucun moment il y ait eu de véritable coagulation et sans qu'il se soit produit aucune altération de structure appréciable par nos procédés ordinaires d'investigation.

En résumé, ce qui ressort le plus clairement de nos observations et de nos expériences, c'est que l'anesthésie générale n'est qu'un mode particulier de vie latente dans lequel l'eau joue, 530 comme dans les autres, le rôle principal. L'état d'hydratation normal du protoplasme est une condition fondamentale de son fonctionnement physiologique, et toutes les manifestations vitales peuvent être suspendues temporairement ou définitivement quand cette condition fondamentale n'est pas satisfaite.

Les faits expérimentaux sur lesquels repose notre théorie du *mécanisme physiologique des anesthésiques généraux* nous paraissent suffisants pour qu'il ne soit pas permis de la considérer comme une simple hypothèse *a priori*. On ne saurait d'ailleurs lui contester le caractère d'une théorie exacte puisqu'elle a permis 540 non seulement d'expliquer les faits connus, mais encore d'en découvrir de nouveaux tout à fait inattendus.

D^r^ R. DUBOIS,
Professeur de Physiologie générale et comparée
à la Faculté des Sciences de Lyon.

Revue Générale des Sciences,
15 *Septembre* 1891.

LE PANCRÉAS

LES DÉCOUVERTES RÉCENTES SUR LA PHYSIOLOGIE DU PANCRÉAS

Le pancréas est une grosse glande située dans la cavité abdominale ; la tête est enclavée dans le duodénum, à droite, et la queue s'étend jusqu'à la rate, à gauche. Le liquide sécrété par cette glande, ou suc pancréatique, se déverse dans le duodénum par deux canaux : un principal, le canal de Wirsung, et un accessoire.

L'action de ce liquide s'exerce sur les substances alimentaires qui arrivent dans le duodénum après avoir été déjà modifiées pour partie par la salive et par le suc gastrique ; c'est une action énergique, due à trois ferments solubles, élaborés par les cellules pancréatiques et qui constituent les principes essentiels du suc glandulaire. L'un de ces ferments agit sur les matières amylacées pour les transformer en glycose (ferment analogue à la diastase salivaire), l'autre sur les matières albuminoïdes pour les peptoniser (c'est la trypsine), et le troisième sur les graisses pour les saponifier. L'importance de cette digestion pancréatique est très grande. On peut priver un animal de son estomac sans qu'il cesse de digérer à merveille ; si on lie les canaux pancréatiques sur un autre animal, il faut donner à celui-ci des quantités considérables d'aliments pour qu'il ne maigrisse pas ; encore ne digère-t-il surtout que les matières albuminoïdes.

Tous ces faits avaient été solidement établis par les recherches de Valentin, de Corvisart et par les nombreux travaux de Claude Bernard, confirmés, développés aussi et complétés sur certains points par différents expérimentateurs. Et ainsi le pancréas était considéré comme une glande des plus importantes pour les fonctions digestives, la plus importante même, son rôle étant de beaucoup supérieur à celui de l'estomac, plus étendu et vraiment essentiel.

Des recherches récentes sont venues montrer que le pancréas possède encore une autre fonction. Le fait fondamental, dont

on doit la première notion à von Mering et Minkowski, est celui-cl : *quand le pancréas a été complètement enlevé à un chien, cet animal devient diabétique.*

La question se pose dès lors de savoir quel est le rôle joué par cet organe dans les transformations que subissent dans l'organisme les matières sucrées.

I

L'existence d'une relation causale entre le diabète et des lésions destructives du pancréas avait déjà été soupçonnée ou hypothétiquement admise par plusieurs médecins. Dès le siècle dernier, en 1788, un médecin anglais, Cawley, fit connaître dans le *London medical Journal* l'histoire d'un diabétique, à l'autopsie duquel on trouva les canaux du pancréas remplis de calculs. Richard Bright, en 1833, publia une observation analogue de diabète à marche rapide; on vit à l'autopsie que la tête du pancréas était adhérente aux organes voisins; toute la glande était dure et cartilagineuse. On peut citer d'autres observations isolées: celles de Claude Bernard, au nombre de trois, d'ailleurs très sommairement rapportées; le cas de Griesinger, en 1859; ceux de Frerichs (1862); les deux cas (1864) de von Recklinghausen; celui de Klebs et Munk (1870); quelques autres encore.

Mais ces faits restaient à l'état de particularités sans valeur. Ce n'est pas, à dire vrai, que quelques esprits n'aient été frappés de la possibilité d'un rapport nécessaire entre le diabète et ces lésions signalées du pancréas. Ainsi, Bouchardat, en 1846 déjà, alors qu'il venait d'étudier avec Sandras l'action du suc pancréatique sur les matières amylacées, et que son attention était attirée sur l'importance de la fonction digestive de cette glande, vivement intéressé, d'autre part, par les quelques cas connus à cette époque de diabète avec lésion du pancréas, écrivait: « Je conjure les praticiens qui verront des malades atteints de diabète de ne point perdre de vue le pancréas, qui joue le rôle principal dans le digestion des féculents.» En 1875, dans la première édition de son traité: *De la Glycosurie ou du diabète*

sucré, il renouvelait cet appel, persistant à penser que les troubles de la fonction pancréatique pourraient expliquer la pathogénie du diabète. Telle paraissait être aussi l'opinion de Seegen et surtout celle de Lécorché. Par contre, Griesinger estimait les
70 faits insuffisants pour que l'on pût établir une relation de cause à effet entre les lésions constatées et le diabète. Frerichs émettait la même opinion. En France, Jaccoud déclarait que l'atrophie du pancréas pouvait constituer simplement une lésion contingente du diabète, de même que les altérations du foie et des reins.

En définitive, il est manifeste que dans cette longue période qui s'étend de 1788 à 1877 il n'apparaît aucune donnée certaine sur cette question des rapports entre le pancréas et le diabète. On peut désigner cette période sous le nom de *phase hypo-*
80 *thétique.*

La deuxième période, beaucoup plus courte, va de 1877 à 1889; c'est la *phase de l'observation clinique* ou *période de discussion.* C'est à Lancereaux que revient le grand mérite d'avoir nettement distingué la forme pancréatique du diabète. Son premier travail sur ce sujet date du 13 novembre 1877; en 1879, son élève Lapierre soutient sur le même sujet une thèse importante citée ci-dessus; il reprend lui-même la question dans une série de leçons cliniques publiées en 1880 par l'*Union médicale*; il communique de nouveaux faits à l'Académie de médecine en
90 1888 et traite encore la question dans des leçons cliniques en 1889-1890.

Tout l'effort de Lancereaux a consisté à établir solidement l'existence d'un diabète «à allures cliniques spéciales,» que caractérisent la brusquerie du début, la gravité des symptômes (amaigrissement rapide et excessif, intensité de la faim et de la soif, énorme quantité de sucre s'élevant à 300, 400, 500 et 800 grammes par 24 heures, etc.) et la rapidité de l'évolution. Dans tous les cas où cette forme clinique s'observe, on trouve des lésions du pancréas à l'autopsie, le plus généralement l'atrophie,
100 quel que soit le processus spécial qui ait amené cette atrophie. De là, le nom de *diabète maigre* donné par Lancereaux à cette

affection, pour rappeler l'état cachectique si particulier que présentent les malades, ou *diabète pancréatique*; de là aussi sa conception générale des trois formes du diabète: le gras ou constitutionnel (c'est la forme la plus fréquente, celle qui est depuis si longtemps connue), le maigre ou pancréatique, et le nerveux (par lésions du bulbe, de la protubérance, etc.).

Malgré la valeur des faits groupés par Lancereaux et des considérations que ces faits lui inspirèrent et malgré le talent avec lequel ce clinicien sagace défendit ses idées, son opinion ne 110 laissa pas d'être vivement discutée.

A dire le vrai, quelques difficultés se présentaient d'elles-mêmes. Les plus graves étaient celles-ci: 1° il existe des cas d'altérations graves du pancréas sans diabète; 2° on voit chez certaines malades des symptômes de diabète, dit pancréatique, sans lésions du pancréas. Cyr, dans l'étude que j'ai citée plus haut, se place sur ce terrain pour combattre les idées de Lancereaux; il rappelle qu'Ancelet déjà était parvenu à réunir 385 cas d'affections du pancréas *avec autopsie* et qu'il avait mentionné la coïncidence du diabète avec des lésions de cet 120 organe, mais qu'il avait eu soin d'ajouter qu'il n'était pas possible pour le moment de démontrer une action réelle du pancréas sur la production du diabète. Dans cette critique de Lancereaux, Cyr fut sui vipar Salles, Madre, Caron qui tous rapportèrent de nombreux cas de cancer du pancréas dans lesquels on n'avait jamais trouvé de sucre dans les urines ni constaté un seul symptôme du diabète.

Sans doute Lancereaux discutait les objections, se demandant si l'altération du pancréas, dans les observations qu'on lui opposait, avait été complète; faisant remarquer, d'autre part, que 130 l'atrophie du pancréas peut fort bien ne pas être la seule lésion susceptible de déterminer les symptômes du diabète maigre.

La cause néanmoins était loin d'être définitivement entendue pour tous les médecins; et c'est un fait que la question restait controversée. Je n'en donnerai qu'une preuve, tirée de la grande Encyclopédie médicale qui se publiait à cette époque sous la direction de Dechambre: dans son excellent article *Diabète* si consciencieusement informé, E. Demange dit au sujet des diffé-

rentes formes du diabète : « Ces formes ne correspondent point
140 à des types bien distincts. Il est vrai que chez tel diabétique ce sont les accidents nerveux qui dominent et paraissent jouer un rôle important dans la production du diabète, que chez tel autre on note surtout des antécédents héréditaires personnels qui le rattachent à la grande diathèse arthritique si bien étudiée par Bazin ; que chez celui-ci ce sont les troubles digestifs qui semblent tenir la première place, tandis que chez celui-là ce sont des troubles hépatiques ; que tel diabétique a été gras avant ou pendant son diabète, que tel autre a été maigre. Mais sont-ce là des différences suffisantes pour établir des variétés de diabète ?
150 nous ne le pensons pas. C'est toujours la même entité morbide, le diabète sucré, avec quelque modalité symptomatique spéciale, motivant des formes, si l'on veut, caractérisées par le prédominance de tel ou tel symptôme ; souvent ce ne sont que des coïncidences morbides, plus souvent encore des phases successives de la même maladie.» Il est donc bien permis d'appeler cette deuxième période la *phase de discussion.*

En 1889, la question entre dans une troisième période : c'est la *phase physiologique* ou *de démonstration*. Quels qu'aient été l'intérêt et la valeur des données nouvelles apportées sur la
160 question par Lancereaux, il n'est pas contestable qu'il subsistait de vives oppositions à ses idées. Maintenant toutes les difficultés vont être levées par les recherches physiologiques ; il suffira pour cela de quelques expériences clairement conçues et bien conduites.

II

Quelle est l'expérience cruciale de von Mering et Minkowski ? Pour qu'il y ait diabète chez un chien auquel on enlève le pancréas, il faut que cette extirpation soit *totale* ; s'il reste un petit morceau de glande, le sucre ne passe pas dans les urines, et, à part les troubles digestifs, qui tiennent à ce que le suc
170 pancréatique n'arrive plus dans l'intestin, l'animal n'est pas malade.

Dès lors tout devient clair. On a trouvé, disait-on, des altéra-

tions du pancréas sans qu'il y ait eu diabète; rien d'étonnant, si la glande n'avait pas été complètement détruite par le processus morbide.

De même s'expliquent aisément les insuccès des physiologistes qui avant von Mering et Minkowski avaient essayé d'enlever le pancréas. Ces essais sont assez nombreux. En 1682-1685, Conrad Brunner pratiqua sur des chiens l'ablation du pancréas; il ne put réussir qu'à en extirper une partie. En 1846, 180 Bouchardat et Sandras recommencèrent cette opération; tous leurs animaux périrent. Claude Bernard, considérant, après des essais infructueux, l'opération comme impossible, tenta des injections de matières grasses (huile, suif, etc.) dans la glande par le canal de Wirsung, dans l'espoir de détruire ainsi le pancréas: il n'obtint par ce moyen que des troubles digestifs; l'examen des urines ne fut d'ailleurs pas pratiqué. Schiff (1872) répéta cette opération, en se servant de paraffine; ses animaux n'ont présenté aucun trouble. Quant aux tentatives de Bérard et Colin (1858), de Klebs et Munk (1869), de Finkler (1886), 190 de Senn (1888), de Martinotti (1888), elles n'ont pas donné de résultats, soit que leurs auteurs n'aient pas enlevé toute la glande, soit que l'examen des urines n'ait pas été fait.

Les premiers donc, von Mering et Minkowski sont parvenus à enlever sur le chien *tout* le pancréas.

Le résultat de l'opération est constant. La glycosurie commence d'ordinaire 4 à 6 heures après l'opération et atteint son maximum au bout de 36 heures. La quantité de glycose éliminée varie entre 5 à 11 pour 100. Tous les symptômes du diabète se montrent en même temps: les animaux deviennent 200 d'une voracité extraordinaire; ils ont une soif intense; la polyurie est très marquée; un chien de 7 kilog. urinait de 1000 à 1200 c. c. par jour. L'amaigrissement, malgré la suralimentation, est très rapide; et bientôt l'affaiblissement devient tel que les animaux ne peuvent plus marcher; les poils tombent, les plaies ne peuvent se cicatriser; la mort arrive dans le marasme en un mois ou deux.

Comme phénomènes secondaires, il faut signaler l'absence à peu près complète de glycogène dans le foie et les muscles, la présence

210 d'acétone, d'acide acétylacétique et d'acide oxybutyrique dans les urines. On sait qu'on a trouvé ces divers corps dans l'urine des diabétiques.

L'autopsie montre, à côté des complications, telles que certaines lésions pulmonaires, une dégénérescence graisseuse du foie.

Mais il fallait démontrer que tout cet ensemble de symptômes est bien dû à la suppression de la glande.

Il est certain d'abord que ce diabète ne tient pas à ce que le suc pancréatique n'arrive plus dans l'intestin. La ligature des 220 canaux excréteurs n'amène qu'une atrophie progressive de la glande, sans glycosurie, comma l'avaient déjà vu Claude Bernard, Pawlow, Arnozan et Vaillard.

La grosse objection à écarter provenait de la production inévitable, dans une telle opération, de lésions nerveuses susceptibles de déterminer la glycosurie : il est impossible, en effet, quand on enlève le pancréas, de ne pas sectionner et irriter un grand nombre de filets sympathiques dont l'excitation peut agir sur le plexus solaire. Or, les physiologistes savent bien que certaines de ces lésions amènent la glycosurie : pour le plexus 230 solaire, le fait est acquis (Klebs et Munk, Lustig, etc.).

Assurément, dans ce fait il n'y a rien d'absolument comparable au complexus de phénomènes si caractéristiques, résultant de l'ablation du pancréas. Néanmoins von Mering et Minkowski s'attachèrent à démontrer par des expériences directes que les lésions nerveuses, nécessairement produites au cours de l'opération, ne sont pour rien dans le diabète. En effet, celui-ci ne s'observe pas, même si l'on sépare complètement le pancréas du duodénum, en ne le laissant qu'en rapport avec le mésentère, opération qui ne peut être réalisée sans déchirer ou lier, bref, 240 sans irriter des filets sympathiques. Du reste, l'ablation presque totale du pancréas, respectant seulement une petite portion de l'organe, au voisinage de la rate, par exemple, opération qui implique les mêmes traumatismes nerveux que l'ablation complète, n'est pas suivie de diabète. Si l'on vient alors, au bout d'un temps plus ou moins long, à enlever cette portion restante du pancréas, le diabète se produit. Hédon (de Montpellier) a

donné une remarquable confirmation de ces expériences. J'ajoute que l'extirpation totale du pancréas se pratique sans que l'on touche directement au plexus solaire.

Les résultats obtenus par von Mering et Minkowski ont été 250 confirmés par Lépine et surtout par Hédon (de Montpellier), dans deux mémoires fort intéressants, où il fit connaître un procédé d'ablation du pancréas relativement facile, et enfin par moi-même qui décrivis un procédé simple, non plus d'ablation, mais de destruction du pancréas, au moyen d'une injection, dans le canal de Wirsung, de gélatine ou de suif colorés.

Cet artifice permet de voir si toute la glande s'injecte. J'ai pu par suite reconnaître que très souvent il reste des parties de l'organe qui ne s'injectent pas du premier coup. Ainsi s'explique l'insuccès des anciennes expériences de Claude Bernard 260 relatives à l'injection de matières étrangères dans le canal pancréatique (voy. ci-dessus) : une partie de la glande échappait évidemment à la destruction, sans qu'il fût possible à l'expérimentateur de s'en apercevoir, de telle sorte qu'au bout d'un temps variable les animaux se rétablissaient. L'expérience que j'ai réalisée ne laisse pas d'offrir un réel intérêt historique, puisqu'elle montre combien près, en définitive, Claude Bernard a été de découvrir l'importante fonction du pancréas qu'il était réservé à von Mering et Minkowsky de trouver.

III

Depuis le premier travail de ces deux auteurs, quelques faits 270 nouveaux ont été mis en lumière.

Minkowski a réussi à produire un diabète correspondant, d'après lui, à la forme légère de cette maladie chez l'homme, en enlevant à un chien les neuf dixièmes du pancréas ; l'animal n'avait pas de glycosurie aussi longtemps qu'il ne recevait comme nourriture que de la viande. Au contraire, un régime composé d'hydrates de carbone déterminait une glycosurie abondante.

Hédon a distingué une autre forme de diabète. Sur quelques chiens il a observé, non plus le diabète à marche rapide, dans 280

lequel l'élimination du sucre et de l'azote est excessive et qui amène la mort au bout de 15 à 30 jours, mais un diabète à marche lente, dans lequel la glycosurie est intermittente, où elle manque même souvent pendant un long temps, mais où il y a toujours une élimination considérable d'azote; les autres symptômes du diabète existent aussi, mais l'azoturie est dans ce cas le symptôme prédominant; l'animal ne succombe à la cachexie qu'au bout de plusieurs mois. Hédon rapproche ces faits du diabète azoturique ou insipide observé chez l'homme. J'ai
290 signalé de mon côté, en même temps que Hédon, cette dénutrition profonde, indépendante de la glycosurie, que l'on peut observer chez quelques animaux.

Il se produit donc, à la suite de la suppression du pancréas, un trouble remarquable de la nutrition essentiellement caractérisé par un défaut dans l'utilisation des matériaux azotés. Déjà von Mering et Minkowski avaient indiqué ce fait important. Hédon, qui a jusqu'à présent le plus complètement étudié cette question, trouve que presque tout l'azote des aliments passe dans les *excreta*, une très faible partie étant utilisée.

300 Il faut remarquer que ces résultats s'observent particulièrement chez les chiens dont une partie seulement du pancréas a été extirpée et l'autre détruite par une injection de substance étrangère (expériences de Hédon) et chez lesquels la glycosurie est faible et intermittente.

Au contraire chez ces animaux les matériaux sucrés paraissent être encore en partie utilisés. Si en effet on mélange à leurs aliments une certaine quantité de sucre, on constate que le sucre éliminé par les urines représente seulement une partie du sucre ingéré (pas même la moitié).

310 En ce qui concerne les matières amylacées, j'ai déjà dit que l'ingestion de ces substances augmente la glycosurie ou la produit chez les animaux qui n'en présentaient pas.

Les choses ne se passent pas tout à fait de la même façon chez les chiens dont la glycosurie est intense, immédiatement après l'extirpation du pancréas. Ces animaux n'utilisent guère mieux les matériaux azotés, et pas davantage les féculents: mais lorsqu'on leur fait ingérer du sucre, ce sucre passe complète-

ment dans les urines. Ainsi un chien de 6 kil. et demi, observé par Hédon, qui éliminait par jour en moyenne 19 grammes de sucre, si on lui donnait dans sa nourriture 15 grammes de sucre 320 de raisin chimiquement pur, éliminait le lendemain 34 gr. 5 de sucre. Von Mering et Minkowski, Hédon ont cité un certain nombre de faits analogues.

A la vérité, quelques-uns de ces résultats peuvent être critiqués pour la raison suivante. Les expériences de Claude Bernard, de Pawlow, ont bien montré que la ligature des canaux pancréatiques suffit pour amener des troubles nutritifs et l'amaigrissement. Ces phénomènes tiennent au rôle digestif important du pancréas, que l'on rappelait au début de cet article. Dès que la glande ne peut plus remplir ses fonctions digestives, la nutri- 330 tion générale est atteinte.

Par suite, chez les animaux qui, comme on vient de le dire, paraissent encore utiliser une partie du sucre qu'on leur fait ingérer, il importerait, pour être bien assuré de la réalité de ce phénomène, de rechercher si la partie du sucre qui ne passe pas dans les urines (et que l'on considère comme retenu dans l'organisme) n'à pas simplement traversé le tube intestinal et ne se retrouve pas dans les fèces.

De même, on pourra admettre définitivement que le défaut d'utilisation des matériaux azotés ne dépend pas du tout de la 340 suppression du pancréas en tant que glande servant à la digestion, quand on aura soumis les expériences faites jusqu'à présent sur ce point à la contre épreuve, c'est-à-dire quand on les aura répétées sur des animaux chez lesquels l'arrivée du suc pancréatique dans l'intestin aura été complètement empêchée, et d'une façon durable. Je poursuis depuis quelque temps des expériences de ce genre. Ces recherches semblent d'autant plus nécessaires que déjà Abelmann, dans des expériences faites sous la direction de Minkowski, a montré que les animaux sur lesquels on pratique seulement l'extirpation *incomplète* du pan- 350 créas ne résorbent les albuminoïdes en moyenne que dans la proportion de 54 pour 100.

Néanmoins, dès maintenant plusieurs résultats peuvent être considérés comme acquis. Quelques expériences de Hédon

paraissent bien prouver la réalité d'une certaine dénutrition azotée, celles par exemple qui montrent qu'un chien soumis au jeûne, après la destruction du pancréas par une injection de paraffine, subit une diminution de poids et une perte d'urée par jour beaucoup plus considérables qu'un chien témoin.—D'autre
360 part, la glycosurie d'origine alimentaire doit être tenue pour démontrée, et par suite l'utilisation très défectueuse, sinon absolument nulle, des matériaux sucrés.

IV

On a vu que cette question des rapports entre les fonctions du pancréas et le diabète a traversé trois grandes phases. Dans la première on suppose qu'il existe une relation entre cette maladie et des altérations du pancréas. Dans la deuxième on apporte un assez grand nombre de faits à l'appui de cette opinion; mais ce sont des faits cliniques, susceptibles d'interprétations contradictoires. Dans la troisième l'expérimentation
370 physiologique montre qu'il y a une relation certaine et constante entre la suppression du pancréas et le diabète. C'est la phase vraiment scientifique de la question. A partir de ce moment commence la *période des explications.*

Car, s'il est démontré que l'extirpation totale du pancréas amène le diabète, quelle est la cause de ce fait? quelle est la fonction du pancréas dont la suppression donne lieu à un trouble aussi grave?

Depuis les travaux de Claude Bernard, les transformations des substances sucrées dans l'organisme semblaient bien con-
380 nues: les matières amylacées ingérées sont transformées dans l'intestin en glycose, sous l'action surtout de la diastase contenue dans le suc pancréatique; cette glycose est absorbée et apportée au foie par la veine porte; là elle est déshydratée (par une action restée inconnue) et se transforme en un isomère de l'amidon, le glycogène (amidon animal); ce glycogène constitue une réserve importante aux dépens de laquelle la cellule hépatique fabrique constamment, suivant les besoins de l'organisme, de la glycose (sous l'influence d'un ferment [Cl. Bernard]

qui n'a jamais pu être isolé et dont l'existence par suite reste douteuse [Dastre]) ; ce sucre, déversé dans le sang par les veines 390 sus-hépatiques, est brûlé dans les tissus (Chauveau). Quelques modifications de détail ont été apportées à cette théorie, additions ou restrictions, mais les faits généraux sont restés debout.

Par suite on pouvait sans peine s'expliquer le diabète. Pour ne pas parler de la forme légère, tenant à ce que le foie ne peut fixer le sucre des aliments (absorbé en trop grand excès, par exemple) et le laisse passer dans le sang, il était possible de comprendre la maladie soit comme dépendant d'une suractivité fonctionnelle de foie (amenée elle-même par une cause quelconque, cause nerveuse par exemple), de laquelle résulte une production 400 exagérée de glycogène et de sucre, soit comme tenant à un défaut d'utilisation du sucre par le tissus (théorie développée surtout dans ces dernières années par Ch. Bouchard).

La découverte de von Mering et Minkowski, rapprochée des faits clinique si bien étudiés par Lancereaux, est venue montrer d'une façon irréfragable qu'il existe un diabète d'origine pancréatique. Assurément rien ne prouve, aujourd'hui comme hier, qu'il ne puisse y avoir diabète à la suite d'une production exagérée de sucre aux dépens du glycogène du foie (sous l'influence, par exemple, de troubles vaso-moteurs hépatiques, dépen- 410 dant eux-mêmes de lésions nerveuses diverses). Mais comment s'explique le diabète pancréatique ?

Von Mering et Minkowski ont, sur ce point, fait preuve d'une grande prudence, fort louable en somme. Ils ont en effet conclu simplement de leurs expériences que le pancréas possède une *fonction spécifique inconnue* qui consiste à régler les échanges nutritifs et la combustion du sucre. Hédon n'a pas du tout abordé la question de ce mécanisme fonctionnel. Mais une série déjà longue d'expériences intéressantes a été faite sur ce sujet par Lépine (de Lyon) qui les poursuit encore avec 420 persévérance.

Le fait pris par Lépine pour point de départ de ses recherches a été déjà très nettement signalé par Claude Bernard et constaté aussi après celui-ci par plusieurs autre physiologistes ; c'était même une notion classique ; mais Lépine en a entrepris une

étude systématique qui l'a conduit aux résultats qu'il s'agit maintenant d'exposer.

Ce fait est le suivant : le sang normal, abandonné à lui-même à sa sortie d'un vaisseau, perd en un laps de temps donné une
430 certaine quantité de sucre qu'il contient. C'est ce phénomène que Lépine a étudié de très près, avec la collaboration de Barral, sur le chien normal et sur le chien diabétique. Il a d'abord constaté que cette perte de sucre, en une heure, pour le sang artériel de chien, à la température de 39°, varie entre 20 et 40% de la teneur initiale. Or, chez le chien rendu diabétique par l'ablation du pancréas, la quantité de sucre détruit n'est plus que de 6%.

Il en est de même chez l'homme. Chez l'homme sain, le pouvoir glycolytique (cette destruction du sucre dans le sang
440 étant appelée glycolyse) est de 25% environ ou un peu plus; chez l'homme diabétique il peut tomber à 1,6% et oscille entre ce chiffre et celui de 7%, c'est-à-dire qu'en une heure il ne se détruit dans du sang de diabétique que 1, 6% du sucre que contient ce sang.

Ce sont ces observations très neuves et fort intéressantes qui ont dirigé toutes les recherches de Lépine et Barral. D'après eux en effet, le sang tiendrait du pancréas ce pouvoir glycolytique. Chez le chien en digestion, la lymphe du canal thoracique et surtout le sang de la veine porte (qui reçoit le
450 sang des veines pancréatiques) possèdent un pouvoir glycolytique bien supérieur à celui du sang artériel ou veineux en général. Lépine suppose dès lors que les cellules pancréatiques produisent un ferment soluble qui passe dans le sang veineux et auquel il a donné le nom de *ferment glycolytique*.

Voici comment il prouve l'existence de ce ferment: si l'on transfuse du sang frais, le dépôt formé par les globules possède un pouvoir glycolytique considérable, tandis que le sérum n'est pour ainsi dire pas doué de cette propriété. Si l'on remplace le sérum par de l'eau salée, celle-ci prend ce pouvoir aux globules:
460 « On peut ainsi laver plusieurs fois de suite les globules avec de l'eau salée et leur enlever chaque fois une bonne partie du ferment qu'ils renferment. » C'est particulièrement dans les globules blancs que se trouve fixé le ferment, car il existe dans

le chyle et dans les parties du sang transfusé qui sont les plus riches en globules blancs.—Le ferment atteint son maximum d'activité à 39°; une température de 55° le détruit; à cette température on ne constate pas de perte de sucre dans le sang par rapport à la quantité initiale.

L'application de toutes ces données au diabète d'origine pancréatique suivait immédiatement et nécessairement, très simple 470 d'ailleurs. Le pancréas produit normalement un ferment grâce auquel le sucre se détruit dans le sang d'une façon régulière et constante; si cet organe est enlevé expérimentalement ou détruit par un processus pathologique quelconque, le ferment glycolytique disparaît par cela même ou diminue, et la destruction du sucre se fait d'une manière incomplète, d'où la glycosurie et tous les symptômes du diabète.

Cependant Lépine, ayant reconnu que le sang, après l'ablation du pancréas, possède encore un certain pouvoir glycolytique, admet que le pancréas peut n'être pas la source exclusive du 480 ferment. Hédon, à cause des faits de glycosurie intermittente qu'il a observés, est porté aussi à croire que, dans certaines conditions expérimentales (suppression graduelle de la fonction), le pancréas peut être suppléé par d'autres organes.—D'autre part, Lépine, tout en considérant le diabète comme lié à la diminution du ferment glycolytique, c'est-à-dire au défaut de destruction du sucre, reconnaît que dans certains cas, il peut y avoir et il y a en outre production exagérée de sucre.

Quelque séduisante que soit la théorie de Lépine en raison de la simplicité même et de la clarté des faits expérimentaux sur 490 lesquels elle a été fondée, il semble qu'on puisse émettre quelques réserves. D'abord le ferment glycolytique n'a pas été isolé du pancréas lui-même. Les objections qu'on a fait valoir à maintes reprises contre l'existence de la diastase hépatique, un peu trop facilement admise par Claude Bernard, doivent valoir aussi dans le cas présent. D'autre part, on admet que sur l'animal vivant le sucre se détruit, non pas dans le sang, mais dans les tissus (Chauveau), pour servir par sa combustion au travail physiologique.

Ce sont là des raisons d'ordre général sur lesquelles, malgré 500 leur valeur, l'expérience l'emporterait, si l'expérience parlait

contre elles. Il est certain que l'importance des deux faits principaux découverts par Lépine et Barral est grande: la diminution du pouvoir glycolytique chez les animaux diabétiques et la grandeur de ce pouvoir dans le sang de la veine-porte. Mais le sang de la veine-porte reçoit beaucoup d'autres produits que ceux qui peuvent provenir du pancréas; l'expérience n'acquerrait, ce semble, toute sa signification que si d'abord un ferment produisant la destruction du sucre avait été isolé du
510 tissu pancréatique lui-même. D'autre part, la diminution de la glycolyse chez les diabétiques n'apparaissant pas comme nécessairement liée a un trouble fonctionnel du pancréas, la glycolyse elle-même pouvait varier sous un grand nombre d'influences.

Tout récemment d'ailleurs cette question même de la glycolyse s'est compliquée à la suite des expériences d'Arthus, faites dans le laboratoire du professeur Dastre. Arthus s'est attaché à montrer que la glycolyse est un phénomène cadavérique, de même nature que la coagulation du sang; que le ferment glycolytique ne préexiste pas dans le sang circulant; qu'il se forme
520 en dehors des vaisseaux, aux dépens des globules blancs; que, du reste, la destruction du sucre n'est diminuée qu'en apparence chez les diabétiques, la quantité absolue du sucre ayant augmenté. —Lépine et Barral ont, il est vrai, répondu à Arthus.

V

Nous nous retrouvons maintenant presque au point où nous étions après l'exposé des faits. La fonction nouvelle du pancréas ne nous est pas encore, ce semble, complètement révélée.

Assurément—et ceci a été déjà dit à plusieurs reprises au cours de cette étude—ce n'est pas en tant que glande digestive que le pancréas agit sur les matières sucrées. Il faut bien
530 admettre alors qu'il se comporte comme une de ces glandes, dites vasculaires sanguines, et qu'il vaudrait mieux appeler avec Brown-Séquard «glandes à sécrétion interne,» qui, hier encore, apparaissaient comme la *terra incognita* de la physiologie. Et il faut considérer ces glandes comme versant dans le sang, leurs veines servant de canaux excréteurs, des produits, ferments

solubles ou autres principes, dont l'importance est grande pour la nutrition générale. De fait, j'ai pu démontrer que la ligature de toutes les veines pancréatiques, opération extrêmement laborieuse, mais que je suis parvenu à réussir un petit nombre de fois, détermine chez le chien la glycosurie. Il est donc 540 nécessaire que la circulation veineuse du pancréas ne soit pas complètement supprimée pour que l'organe puisse agir sur les matières sucrées de l'économie.

Ainsi, à titre de glande vasculaire sanguine, le pancréas prend place à côté du foie, du corps thyroïde, des capsules surrénales, etc. Jusqu'à Claude Bernard on a considéré le foie comme la glande biliaire; la découverte de la fonction glycogénique, de la formation, aux dépens de la matière glycogène, de la glycose que les veines sushépatiques déversent ensuite dans le sang, a donné au foie une importance nouvelle. Presque à la même 550 époque Brown-Séquard (1851) montrait que l'extirpation des capsules surrénales détermine de graves accidents et la mort. Plus tard (1884) on reconnut que le corps thyroïde, organe glandulaire dont on ignorait entièrement la fonction, en possède une des plus importantes, puisque son ablation totale amène la mort, au milieu des troubles nerveux les plus graves. Voici maintenant que le pancréas nous apparaît comme doué sur les échanges nutritifs d'un pouvoir spécial et considérable.

A la vérité, exception faite pour la fonction glycogénique du foie, toutes ces questions viennent seulement de traverser la 560 *phase de démonstration.* Les faits qui prouvent la réalité de fonctions nouvelles appartenant à ces divers organes sont acquis. Mais quelle est la nature de ces fonctions? Notre ignorance est encore très grande à ce sujet, du moins pour les capsules surrénales, le corps thyroïde, en partie aussi pour la rate. En ce qui concerne la fonction nouvelle du pancréas, on est aujourd'hui, comme on vient de le voir, entré résolûment dans la *phase des explications.*

DR. E. GLEY,
Professeur agrégé de Physiologie
à la Faculté de Médecine de Paris.

Revue Générale des Sciences,
30 *Juillet* 1891.

IV. MATHÉMATIQUES.

Les Géométries non Euclidiennes.

Toute conclusion suppose des prémisses ; ces prémisses elles-mêmes ou bien sont évidentes par elles-mêmes et n'ont pas besoin de démonstration, ou bien ne peuvent être établies qu'en s'appuyant sur d'autres propositions, et comme on ne saurait remonter ainsi à l'infini, toute science déductive, et en particulier la géométrie, doit reposer sur un certain nombre d'axiomes indémontrables. Tous les traités de géométrie débutent donc par l'énoncé de ces axiomes. Mais il y a entre eux une distinction à faire : quelques-uns, comme celui-ci par exemple : « deux quantités égales à une même troisième sont égales entre elles, » ne sont pas des propositions de géométrie, mais des propositions d'Analyse. Je les regarde comme des jugements analytiques à priori, je ne m'en occuperai pas.

Mais je dois insister sur d'autres axiomes qui sont spéciaux à la géométrie. La plupart des traités en énoncent trois explicitement :

1° Par deux points ne peut passer qu'une droite ;

2° La ligne droite est le plus court chemin d'un point à un autre ;

3° Par un point on ne peut faire passer qu'une parallèle à une droite donnée.

Bien que l'on se dispense généralement de démontrer le second de ces axiomes, il serait possible de le déduire des deux autres et de ceux, beaucoup plus nombreux, que l'on admet implicitement sans les énoncer, ainsi que je l'expliquerai plus loin.

On a longtemps cherché en vain à démontrer également le troisième axiome, connu sous le nom de *postulatum d'Euclide.*

Ce qu'on a dépensé d'efforts dans cet espoir chimérique est vraiment inimaginable. Enfin au commencement du siècle et 30 à peu près en même temps, deux savants, un Russe et un Hongrois, Lowatchewski et Bolyai établirent d'une façon irréfutable que cette démonstration est impossible; ils nous ont à peu près débarrassés des inventeurs de géométries sans postulatum; depuis lors l'Académie des Sciences ne reçoit plus guère qu'une ou deux démonstrations nouvelles par an.

La question n'était pas épuisée; elle ne tarda pas à faire un grand pas par la publication du célèbre mémoire de Riemann intitulé: *Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zum Grunde liegen.* Cet opuscule a inspiré la plupart des travaux récents 40 dont je parlerai plus loin et parmi lesquels il convient de citer ceux de Beltrami et de von Helmholtz.

La Géométrie de Lowatchewski.—S'il était possible de déduire le postulatum d'Euclide des autres axiomes il arriverait évidemment qu'en niant le postulatum, et en admettant les autres axiomes, on serait conduit à des conséquences contradictoires; il serait donc impossible d'appuyer sur de telles prémisses une géométrie cohérente.

Or c'est précisément ce qu'a fait Lowatchewski. Il suppose au début que: 50

L'on peut par un point mener plusieurs parallèles à une droite donnée;

Et il conserve d'ailleurs tous les autres axiomes d'Euclide. De ces hypothèses, il déduit une suite de théorèmes entre lesquels il est impossible de relever aucune contradiction, et il construit une géométrie dont l'impeccable logique ne le cède en rien à celle de la géométrie euclidienne.

Les théorèmes sont, bien entendu, très différents de ceux auxquels nous sommes accoutumés et ils ne laissent pas de déconcerter un peu d'abord. 60

Ainsi la somme des angles d'un triangle est toujours plus petite que deux droits et la différence entre cette somme et deux droits est proportionnelle à la surface du triangle.

Il est impossible de construire une figure semblable à une figure donnée mais de dimensions différentes.

Si l'on devise une circonférence en n parties égales, et qu'on

mène des tangentes aux points de division, ces n tangentes formeront un polygone si le rayon de la circonférence est assez petit; mais si ce rayon est assez grand, elles ne se rencontreront 70 pas.

Il est inutile de multiplier ces exemples; les propositions de Lowatchewski n'ont plus aucun rapport avec celles d'Euclide, mais elles ne sont pas moins logiquement reliées les unes aux autres.

La Géométrie de Riemann.—Imaginons un monde uniquement peuplé d'êtres dénués d'épaisseur; et supposons que ces animaux « infiniments plats » soient tous dans un même plan et n'en puissent sortir. Admettons de plus que ce monde soit assez éloigné des autres pour être soustrait à leur influence. 80 Pendant que nous sommes en train de faire des hypothèses, il ne nous en coûte pas plus de douer ces êtres de raisonnement et de les croire capables de faire de la géométrie. Dans ce cas, ils n'attribueront certainement à l'espace que deux dimensions.

Mais supposons maintenant que ces animaux imaginaires, tout en restant dénués d'épaisseur, aient la forme d'une figure sphérique, et non d'une figure plane et soient tous sur une même sphère sans pouvoir s'en écarter. Quelle géométrie pourront-ils construire? Il est clair d'abord qu'ils n'attribueront à l'espace que deux dimensions; ce qui jouera pour eux le rôle de la ligne 90 droite, ce sera le plus court chemin d'un point à un autre sur la sphère, c'est-à-dire un arc de grand cercle; en un mot leur géométrie sera la géométrie sphérique.

Ce qu'ils appelleront l'espace, ce sera cette sphère d'où ils ne peuvent sortir et sur laquelle se passent tous les phénomènes dont ils peuvent avoir connaissance. Leur espace sera donc *sans limites* puisqu'on peut sur une sphère aller toujours devant soi sans jamais être arrêté, et cependant il sera *fini*; on n'en trouvera jamais le bout, mais on pourra en faire le tour.

Eh bien, la géométrie de Riemann, c'est la géométrie 100 sphérique étendue à trois dimensions. Pour la construire, le mathématicien allemand a dû jeter par-dessus bord, non seulement le postulatum d'Euclide, mais encore le premier axiome: *Par deux points on ne peut faire passer qu'une droite.*

Sur une sphère, par deux points donnés on ne peut faire *en*

général passer qu'un grand cercle (qui, comme nous venons de le voir, jouerait le rôle de la droite pour nos êtres imaginaires); mais il y a une exception: si les deux points donnés sont diamétralement opposés, on pourra faire passer par ces deux points une infinité de grands cercles.

De même dans la géométrie de Riemann, par deux points ne 110 passera en général qu'une seule droite; mais il y a des cas exceptionnels où par deux points pourront passer une infinité de droites.

Il y a une sorte d'opposition entre la géométrie de Riemann et celle de Lowatchewski.

Ainsi la somme des angles d'un triangle est:

Égale à deux droits dans la géométrie d'Euclide.

Plus petite que deux droits dans celle de Lowatchewski.

Plus grande que deux droits dans celle de Riemann.

Le nombre des parallèles qu'on peut mener à une droite 120 donnée par un point donné est égal:

A un dans la géométrie d'Euclide,

A zéro dans celle de Riemann,

A l'infini dans celle de Lowatchewski.

Ajoutons que l'espace de Riemann est fini, quoique sans limite, au sens donné plus haut à ces deux mots.

Les surfaces à courbures constantes.—Une objection restait possible cependant. Les théorèmes de Lowatchewski et de Riemann ne présentent aucune contradiction; mais quelque nombreuses que soient les conséquences que ces deux géomètres 130 ont tirées de leurs hypothèses, ils ont dû s'arrêter avant de les avoir toutes épuisées, car le nombre en serait infini; qui nous dit alors que s'ils avaient poussé plus loin leurs déductions, ils n'auraient pas fini par arriver à quelque contradiction?

Cette difficulté n'existe pas pour la géométrie de Riemann, pourvu qu'on se borne à deux dimensions; la géométrie de Riemann à deux dimensions ne diffère pas en effet, nous l'avons vu, de la géométrie sphérique, qui n'est qu'une branche de la géométrie ordinaire et qui est par conséquent en dehors de toute discussion. 140

M. Beltrami, en ramenant de même la géométrie de Lowatchewski à deux dimensions à ne plus être qu'une branche de

la géométrie ordinaire, a réfuté également l'objection en ce qui la concerne.

Voici comment il y est parvenu. Considérons sur une surface une figure quelconque. Imaginons que cette figure soit tracée sur une toile flexible et inextensible appliquée sur cette surface, de telle façon que quand la toile se déplace et se déforme, les diverses lignes de cette figure puissent changer de forme, sans
150 changer de longueur. En général, cette figure flexible et inextensible ne pourra se déplacer sans quitter la surface; mais il y a certaines surfaces particulières pour lesquelles un pareil mouvement serait possible : ce sont les surfaces à courbure constante.

Si nous reprenons la comparaison que nous faisions plus haut et que nous imaginions des êtres sans épaisseur vivant sur une de ces surfaces, ils regarderont comme possible le mouvement d'une figure dont toutes les lignes conservent une longueur constante. Un pareil mouvement paraîtrait absurde, au contraire, à des animaux sans épaisseur vivant sur une surface à courbure
160 variable.

Ces surfaces à courbure constante sont de deux sortes :

Les unes sont *à courbure positive*, et peuvent être déformées de façon à être appliquées sur une sphère. La géométrie de ces surfaces se réduit donc à la géométrie sphérique, qui est celle de Riemann.

Les autres sont *à courbure négative*. M. Beltrami a fait voir que la géométrie de ces surfaces n'est autre que celle de Lowatchewski. Les géométries à deux dimensions de Riemann et de Lowatchewski se trouvent donc rattachées à la géométrie
170 euclidienne.

Interprétation des géométries non-euclidiennes.—Ainsi s'évanouit l'objection en ce qui concerne les géométries à deux dimensions.

Il serait aisé d'étendre le raisonnement de M. Beltrami aux géométries à trois dimensions. Les esprits que ne rebute pas l'espace à quatre dimensions n'y verront aucune difficulté, mais ils sont peu nombreux. Je préfère donc procéder autrement.

Considérons un certain plan que j'appellerai fondamental et construisons une sorte de dictionnaire, en faisant correspondre chacun à chacun une double suite de termes écrits dans deux

colonnes, de la même façon que se correspondent dans les dic- 180
tionnaires ordinaires les mots de deux langues dont la significa-
tion est la même :

Espace . . .	Portion de l'espace située au-dessus du plan fondamental.
Plan . . .	Sphère coupant orthogonalement le plan fondamental.
Droite . . .	Cercle coupant orthogonalement le plan fondamental.
Sphère . . .	Sphère.
Cercle . . .	Cercle. 190
Angle . . .	Angle.
Distance de deux points . . .	Logarithme du rapport anharmonique de ces deux points et des intersections du plan fondamental avec un cercle passant par ces deux points et le coupant orthogonalement.
etc...	etc...

Prenons ensuite les théorèmes de Lowatchewski et traduisons-les à l'aide de ce dictionnaire comme nous traduirions un texte allemand à l'aide d'un dictionnaire allemand-français. *Nous obtiendrons ainsi des théorèmes de la géométrie ordinaire.* 200

Par exemple, ce théorème de Lowatchewski : « la somme des angles d'un triangle est plus petite que deux droits » se traduit ainsi : « Si un triangle curviligne a pour côtés des arcs de cercle qui prolongés iraient couper orthogonalement le plan fondamental, la somme des angles de ce triangle curviligne sera plus petite que deux droits. » Ainsi, quelque loin que l'on pousse les conséquences des hypothèses de Lowatchewski, on ne sera jamais conduit à une contradiction. En effet, si deux théorèmes de Lowatchewski étaient contradictoires, il en serait de même des traductions de ces deux théorèmes, faites à l'aide de notre 210 dictionnaire, mais ces traductions sont des théorèmes de géométrie ordinaire et personne ne doute que la géométrie ordinaire ne soit exempte de contradiction. D'où nous vient cette certitude et est-elle justifiée ? C'est là une question que je ne saurais traiter ici, mais qui est bien intéressante et que je ne crois pas

insoluble. Il ne reste donc plus rien de l'objection que j'ai formulée plus haut.

Ce n'est pas tout. La géométrie de Lowatchewski, susceptible d'une interprétation concrète, cesse d'être un vain exercice de
220 logique et peut recevoir des applications ; je n'ai pas le temps de parler ici de ces applications ni du parti que M. Klein et moi en avons tiré pour l'intégration des équations linéaires.

Cette interprétation n'est d'ailleurs pas unique, et l'on pourrait établir plusieurs dictionnaires analogues à celui qui précède et qui tous permettraient par une simple « traduction » de transformer les théorèmes de Lowatchewski en théorèmes de géométrie ordinaire.

Les axiomes implicites.—Les axiomes explicitement énoncés dans les traités sont-ils les seuls fondements de la géométrie?
230 On peut être assuré du contraire en voyant qu'après les avoir successivement abandonnés on laisse encore debout quelques propositions communes aux théories d'Euclide, de Lowatchewski et de Riemann. Ces propositions doivent reposer sur quelques prémisses que les géomètres admettent sans les énoncer. Il est intéressant de chercher à les dégager des démonstrations classiques.

Stuart Mill a prétendu que toute définition contient un axiome, puisqu'en définissant on affirme implicitement l'existence de l'objet défini. C'est aller beaucoup trop loin ; il est
240 rare qu'en mathématiques on donne une définition sans la faire suivre par la démonstration de l'existence de l'objet défini, et quand on s'en dispense, c'est généralement que le lecteur y peut aisément suppléer. Il ne faut pas oublier que le mot existence n'a pas le même sens quand il s'agit d'un être mathématique et quand il est question d'un objet matériel. Un être mathématique existe, pourvu que sa définition n'implique pas contradiction, soit en elle-même, soit avec les propositions antérieurement admises.

Mais si l'observation de Stuart Mill ne saurait s'appliquer à
250 toutes les définitions, elle n'en est pas moins juste pour quelques-unes d'entre elles. On définit quelquefois le plan de la manière suivante :

Le plan est une surface telle que la droite qui joint deux quelconques de ses points est tout entière sur cette surface.

Cette définition cache manifestement un nouvel axiome ; on pourrait, il est vrai, la changer, et cela vaudrait mieux, mais alors il faudrait énoncer l'axiome explicitement.

D'autres définitions peuvent donner lieu à des réflexions non moins importantes.

Telle est par exemple celle de l'égalité de deux figures : deux 260 figures sont égales quand on peut les superposer ; pour les superposer il faut déplacer l'une d'elles jusqu'à ce qu'elle coïncide avec l'autre ; mais comment faut-il la déplacer ? Si nous le demandions, on nous répondrait sans doute qu'on doit le faire sans la déformer et à la façon d'un solide invariable. Le cercle vicieux serait alors évident.

En fait, cette définition ne définit rien : elle n'aurait aucun sens pour un être qui habiterait un monde où il n'y aurait que des fluides. Si elle nous semble claire, c'est que nous sommes habitués aux propriétés des solides naturels qui ne diffèrent 270 pas beaucoup de celles des solides idéaux dont toutes les dimensions sont invariables.

Cependant, toute imparfaite qu'elle soit, cette définition implique un axiome.

La possibilité du mouvement d'une figure invariable n'est pas une vérité évidente par elle-même ; ou du moins elle ne l'est qu'à la façon du postulatum d'Euclide et non comme le serait un jugement analytique *a priori*.

D'ailleurs en étudiant les définitions et les démonstrations de la géométrie on voit qu'on est obligé d'admettre, sans les 280 démontrer, non seulement la possibilité de ce mouvement, mais encore quelques-unes de ses propriétés.

C'est ce qui ressort d'abord de la définition de la ligne droite. On en a donné beaucoup de défectueuses, mais la véritable est celle qui est sous-entendue dans toutes les démonstrations où la ligne droite intervient :

« Il peut arriver que le mouvement d'une figure invariable soit tel que tous les points d'une ligne appartenant à cette figure restent immobiles pendant que tous les points situés en dehors

de cette ligne se meuvent. Une pareille ligne s'appellera une ligne droite.» Nous avons à dessein, dans cet énoncé, séparé la définition de l'axiome qu'elle implique.

Beaucoup de démonstrations, telles que celles des cas d'égalité des triangles, de la possibilité d'abaisser une perpendiculaire d'un point sur une droite, supposent des propositions qu'on se dispense d'énoncer, puisqu'elles obligent à admettre qu'il est possible de transporter une figure dans l'espace d'une certaine manière.

La quatrième géométrie.—Parmi ces axiomes implicites, il en est un qui me semble mériter quelque attention, non seulement parce qu'il a donné lieu à une discussion récente, mais parce-qu'en l'abandonnant, on peut construire une quatrième géométrie aussi cohérente que celles d'Euclide, de Lowatchewski et de Riemann.

Pour démontrer que l'on peut toujours élever en un point A une perpendiculaire à une droite AB, on considère une droite AC mobile autour du point A et primitivement confondue avec la droite fixe AB ; et on la fait tourner autour du point A jusqu'à ce qu'elle vienne dans le prolongement de AB.

On suppose ainsi deux propositions : d'abord qu'une pareille rotation est possible, et ensuite qu'elle peut se continuer jusqu'à ce que les deux droites viennent dans le prolongement l'une de l'autre.

Si l'on admet le premier point et que l'on rejette le second, on est conduit à une suite de théorèmes encore plus étranges que ceux de Lowatchewski et de Riemann, mais également exempts de contradiction.

Je ne citerai qu'un de ces théorèmes et je ne choisirai pas le plus singulier : *une droite réelle peut être perpendiculaire à elle-même.*

Le Théorème de Lie.—Le nombre des axiomes implicitement introduits dans les démonstrations classiques est plus grand qu'il ne serait nécessaire, et il serait intéressant de le réduire au minimum. On peut se demander d'abord si cette réduction est possible, si le nombre des axiomes nécessaires et celui des géométries imaginables n'est pas infini.

Un théorème de M. Sophus Lie domine toute cette discussion. On peut l'énoncer ainsi :

Supposons qu'on admette les prémisses suivantes :

1° L'espace a n dimensions. 330

2° Le mouvement d'une figure invariable est possible.

3° Il faut p conditions pour déterminer la position de cette figure dans l'espace.

Le nombre des géométries compatibles avec ces prémisses sera limité.

Je puis même ajouter que si n est donné, on peut assigner à p une limite supérieure.

Si donc on admet la possibilité du mouvement, on ne pourra inventer qu'un nombre fini (et même assez restreint) de géométries à trois dimensions. 340

Les géométries de Riemann.—Cependant ce résultat semble contredit par Riemann, car ce savant construit une infinité de géométries différentes, et celle à laquelle on donne ordinairement son nom n'en est qu'un cas particulier.

Tout dépend, dit-il, de la façon dont on définit la longueur d'une courbe. Or il y a une infinité de manières de définir cette longueur, et chacune d'elles peut devenir le point de départ d'une nouvelle géométrie.

Cela est parfaitement exact; mais la plupart de ces définitions sont incompatibles avec le mouvement d'une figure invariable, 350 que l'on suppose possible dans le théorème de Lie. Ces géométries de Riemann, si intéressantes à divers titres, ne pourraient donc jamais être que purement analytiques et ne se prêteraient pas à des démonstrations analogues à celles d'Euclide.

De la nature des axiomes.—La plupart des mathématiciens ne regardent la géométrie de Lowatchewski que comme une simple curiosité logique; quelques-uns d'entre eux sont allés plus loin cependant. Puisque plusieurs géométries sont possibles, est-il certain que ce soit la nôtre qui soit vraie? L'expérience nous apprend sans doute que la somme des angles d'un triangle est 360 égale à deux droits; mais c'est parce que nous n'opérons que sur des triangles trop petits; la différence, d'après Lowatchewski, est proportionnelle à la surface du triangle : ne pourra-t-elle de-

venir sensible quand nous opérerons sur des triangles plus grands ou quand nos mesures deviendront plus précises? La géométrie euclidienne ne serait ainsi qu'une géométrie provisoire.

Pour discuter cette opinion, nous devons d'abord nous demander quelle est la nature des axiomes géométriques.

Sont-ce des jugements synthétiques a priori, comme dirait
370 Kant?

Ils s'imposeraient alors à nous avec une telle force, que nous ne pourrions concevoir la proposition contraire, ni bâtir sur elle un édifice théorique. Il n'y aurait pas de géométrie non euclidienne.

Pour s'en convaincre, qu'on prenne un véritable jugement synthétique a priori, par exemple celui-ci:

Si l'on a une suite infinie de nombres entiers positifs, tous différents entre eux, il y en aura toujours un qui sera plus petit que tous les autres.

380 Ou cet autre qui est équivalent:

Si un théorème est vrai pour le nombre 1, *si on a démontré qu'il est vrai de* n+1, *pourvu qu'il le soit de* n, *il sera vrai de tous les nombres entiers positifs.*

Qu'on essaie ensuite de s'y soustraire et de fonder, en niant ces propositions, une fausse arithmétique analogue à la géométrie non euclidienne,—on n'y pourra pas parvenir; on serait même tenté au premier abord de regarder ces jugements comme analytiques.

D'ailleurs, reprenons notre fiction des animaux sans épaisseur;
390 nous ne pouvons guère admettre que ces êtres, s'ils ont l'esprit fait comme nous, adopteraient la géométrie euclidienne qui serait contredite par toute leur expérience?

Devons-nous donc conclure que les axiomes de la géométrie sont des vérités expérimentales? Mais on n'expérimente pas sur des droites ou des circonférences idéales; on ne peut le faire que sur des objets matériels. Sur quoi porteraient donc les expériences qui serviraient de fondement à la géométrie? La réponse est facile.

Nous avons vu plus haut que l'on raisonne constamment
400 comme si les figures géométriques se comportaient à la manière

des solides. Ce que la géométrie emprunterait à l'expérience, ce seraient donc les propriétés de ces corps.

Mais une difficulté subsiste, et elle est insurmontable. Si la géométrie était une science expérimentale, elle ne serait pas une science exacte, elle serait soumise à une continuelle révision. Que dis-je? elle serait dès aujourd'hui convaincue d'erreur puisque nous savons qu'il n'existe pas de solide rigoureusement invariable.

Les axiomes géométriques ne sont donc ni des jugements synthétiques à priori ni des faits expérimentaux. 410

Ce sont des *conventions*; notre choix, parmi toutes les conventions possibles, est *guidé* par des faits expérimentaux; mais il reste *libre* et n'est limité que par la nécessité d'éviter toute contradiction. C'est ainsi que les postulats peuvent rester *rigoureusement* vrais quand même les lois expérimentales qui ont déterminé leur adoption ne sont qu'approximatives.

En d'autres termes, *les axiomes de la géométrie* (je ne parle pas de ceux de l'arithmétique) *ne sont que des définitions déguisées.*

Dès lors, que doit-on penser de cette question: La géométrie euclidienne est-elle vraie? 420

Elle n'a aucun sens.

Autant demander si le système métrique est vrai et les anciennes mesures fausses; si les coordonnées cartésiennes sont vraies et les coordonnées polaires fausses. Une géométrie ne peut pas être plus vraie qu'une autre; elle peut seulement être *plus commode.*

Or la géométrie euclidienne est et restera la plus commode:

1° Parce qu'elle est la plus simple; et elle n'est pas telle seulement par suite de nos habitudes d'esprit ou de je ne sais quelle intuition directe que nous aurions de l'espace euclidien; 430 elle est la plus simple en soi de même qu'un polynôme du premier degré est plus simple qu'un polynôme du second degré.

2° Parce qu'elle s'accorde assez bien avec les propriétés des solides naturels, ces corps dont se rapprochent nos membres et notre œil et avec lesquels nous faisons nos instruments de mesure.

La géométrie et l'astronomie.—On a également posé la question

d'une autre manière. Si la géométrie de Lowatchewski est vraie, la parallaxe d'une étoile très éloignée sera finie ; si celle
440 de Riemann est vraie, elle sera négative. Ce sont là des résultats qui semblent accessibles à l'expérience et on a espéré que les observations astronomiques pourraient permettre de décider entre les trois géométries.

Mais ce qu'on appelle ligne droite en astronomie, c'est simplement la trajectoire du rayon lumineux. Si donc, par impossible, on venait à découvrir des parallaxes négatives, ou à démontrer que toutes les parallaxes sont supérieures à une certaine limite, on aurait le choix entre deux conclusions : nous pourrions renoncer à la géométrie euclidienne ou bien modifier les lois
450 de l'optique et admettre que la lumière ne se propage pas rigoureusement en ligne droite.

Inutile d'ajouter que tout le monde regarderait cette solution comme plus avantageuse.

La géométrie euclidienne n'a donc rien à craindre d'expériences nouvelles.

Qu'on me passe, en terminant, un petit paradoxe :

Des êtres dont l'esprit serait fait comme le nôtre et qui auraient les mêmes sens que nous, mais qui n'auraient reçu aucune éducation préalable, pourraient recevoir d'un monde
460 extérieur convenablement choisi des impressions telles qu'ils seraient amenés à construire une géométrie autre que celle d'Euclide et à localiser les phénomènes de ce monde extérieur dans un espace non euclidien ou même dans un espace à quatre dimensions.

Pour nous, dont l'éducation a été faite par notre monde actuel, si nous étions brusquement transportés dans ce monde nouveau, nous n'aurions pas de difficultés à en rapporter les phénomènes à notre espace euclidien.

Quelqu'un qui y consacrerait son existence pourrait peut-être
470 arriver à se représenter la quatrième dimension.

Je crains dans ces dernières lignes de n'avoir pas été très clair ; je ne pourrais l'être qu'avec de nouveaux développements ; mais j'ai déjà été trop long et ceux que ces développements pourraient intéresser ont lu Helmholtz.

Dans mon désir d'être bref, j'ai affirmé plus que je n'ai prouvé; que le lecteur veuille bien me le pardonner. On a tant écrit sur ce sujet; on a tant émis d'opinions différentes que la discussion en remplirait un volume.

H. POINCARÉ,
de l'Académie des Sciences.

Revue Générale des Sciences,
15 *Décembre* 1891.

LE PROBLÈME DES TROIS CORPS.

La loi de Newton est la plus simple de toutes les lois physiques; mais elle a pour expression mathématique une équation différentielle, et pour obtenir les coordonnées des astres, il faut intégrer cette équation. Ce problème est un des plus difficiles de l'Analyse, et malgré les recherches persévérantes des géomètres, il est encore bien loin d'être résolu.

I

Quel sera le mouvement de n points matériels, s'attirant mutuellement en raison directe de leurs masses et en raison inverse du carré des distances? Si $n=2$, c'est-à-dire si l'on a affaire à une planète isolée et au Soleil, en négligeant les pertur- 10 bations dues aux autres planètes, l'intégration est facile; les deux corps décrivent des ellipses, en se conformant aux lois de Kepler. La difficulté commence si le nombre n des corps est égal à trois; le *problème des trois corps* a défié jusqu'ici tous les efforts des analystes.

L'intégration complète et rigoureuse étant manifestement impossible, les astronomes ont dû procéder par approximations successives; l'emploi de cette méthode était facilité par la petitesse des masses des planètes, comparées à celle du Soleil. On a donc été conduit à développer les coordonnées des astres 20 suivant les puissances croissantes des masses.

Ce mode de développement n'est pas sans inconvénient; je n'en citerai qu'un: supposons qu'il entre dans l'expression d'une

de ces coordonnées un terme périodique dont la période soit très longue, et d'autant plus longue que les masses troublantes sont plus petites, et développons ce terme suivant les puissances croissantes des masses ; quelque loin que nous poussions l'approximation, la valeur approchée de ce terme ira en croissant indéfiniment, tandis que la vraie valeur reste toujours finie. C'est ainsi qu'en développant sin mt suivant les puissances croissantes de m et négligeant les termes en m^5, on trouve $mt - \frac{1}{6}m^3t^3$, polynôme susceptible de croître indéfiniment, tandis que sin mt est toujours plus petit que 1. La véritable nature de la fonction est donc complètement dissimulée.

Cette méthode a été cependant jusqu'ici très suffisante pour les besoins de la pratique ; les masses sont, en effet, tellement petites qu'on peut, le plus souvent, négliger leurs carrés et se borner ainsi à la première approximation.

Mais on ne peut espérer qu'il en soit toujours ainsi ; il ne s'agit pas seulement, en effet, de calculer les éphémérides des astres quelques années d'avance pour les besoins de la navigation ou pour que les astronomes puissent retrouver les petites planètes déjà connues. Le but final de la Mécanique céleste est est plus élevé ; il s'agit de résoudre cette importante question : la loi de Newton peut-elle expliquer à elle seule tous les phénomènes astronomiques ? Le seul moyen d'y parvenir est de faire des observations aussi précises que possible, de les prolonger pendant de longues années ou même de longs siècles et de les comparer ensuite aux résultats du calcul. Il est donc inutile de demander au calcul plus de précision qu'aux observations, mais on ne doit pas non plus lui en demander moins. Aussi l'approximation dont nous pouvons nous contenter aujourd'hui deviendra-t-elle un jour insuffisante. Et, en effet, en admettant même, ce qui est très improbable, que les instruments de mesure ne se perfectionnent plus, l'accumulation seule des observations pendant plusieurs siècles nous fera connaître avec plus de précision les coefficients des diverses inégalités.

On peut donc prévoir le moment où les méthodes anciennes, malgré la perfection que leur a donnée Le Verrier, devront être abandonnées définitivement. Nous ne serons pas pris au

dépourvu. Delaunay, Hill, Gylden, Lindstedt ont imaginé de nouveaux procédés d'approximation successive plus rapides et plus satisfaisants à tous égards que les anciens ; en particulier, ils se sont affranchis de l'inconvénient que je signalais plus haut.

Les développements auxquels ils parviennent pourraient même être regardés comme une solution complète du problème des trois corps, si la convergence en était établi. Il n'en est malheureusement pas ainsi.

Faute de cette convergence, ils ne peuvent pas donner une approximation indéfinie; ils donneront plus de décimales exactes 70 que les anciens procédés, mais ils n'en donneront pas autant qu'on voudra. Si on l'oubliait, on serait conduit à des conséquences erronées. On en serait vite averti, d'ailleurs, car ces conséquences ne seraient pas les mêmes, selon qu'on appliquerait les méthodes de Delaunay ou celles de Lindstedt, et ces contradictions suffiraient pour montrer qu'un au moins des deux développements n'est pas convergent.

II

Ne peut-on cependant établir aucun résultat relatif au mouvement des trois corps avec cette absolue rigueur à laquelle les géomètres sont habitués ? S'il est possible d'en découvrir, ne 80 pourrait-on y trouver un terrain solide sur lequel on s'appuierait pour marcher à de nouvelles conquêtes ? N'aurait-on pas ouvert une brèche qui permettrait d'entrer enfin dans la forteresse ? On ne peut s'empêcher de le penser, et c'est ce qui donne quelque prix aux rares théorèmes susceptibles d'une démonstration rigoureuse, quand même ils ne semblent pas immédiatement applicables à l'astronomie.

Telles sont les propriétés des solutions particulières remarquables du problème des trois corps.

Le mouvement des trois astres dépend en effet de leurs 90 positions et de leurs vitesses initiales. Si l'on se donne ces conditions initiales du mouvement, on aura défini une solution particulière du problème. Il peut se faire que quelques-unes de ces solutions particulières soient plus simples, plus abordables au

calcul, que la solution générale; il peut se faire que pour certaines positions initiales des trois corps, les lois de leur mouvement présentent des propriétés remarquables.

Parmi ces solutions particulières, les unes ne sont intéressantes que par leur bizarrerie; les autres sont, comme nous le verrons,
100 susceptibles d'applications astronomiques. Lagrange et Laplace ont déjà abordé le problème par ce côté, et ils ont découvert ainsi un théorème important. Il peut arriver que les orbites des trois corps se réduisent à des ellipses. La position et la vitesse initiales de notre satellite auraient pu être telles, que la Lune fût constamment pleine; elles auraient pu être telles que la Lune fût constamment nouvelle; elles auraient pu aussi être telles que cet astre fût constamment à 60° du Soleil dans une phase intermédiaire entre la nouvelle lune et le premier quartier.

Ce sont là des solutions particulières très simples; il y en a de
110 plus compliquées qui sont cependant remarquables. Si les conditions du mouvement avaient été différentes de ce qu'elles sont, les phases auraient pu suivre des lois bien étranges; dans une des solutions possibles, la Lune, d'abord nouvelle, commence par croître; mais, avant d'atteindre le premier quartier, elle se met à décroître pour redevenir nouvelle et ainsi de suite; elle a donc constamment la forme d'un croissant. Dans une autre solution, plus étrange encore, elle passe trois fois par le premier quartier entre la nouvelle lune et la pleine lune; dans cet intervalle, elle croît d'abord, décroît ensuite, pour se mettre de nouveau a
120 croître.

Ces solutions sont trop différentes des véritables trajectoires des astres, pour pouvoir jamais être réellement utiles à l'Astronomie. Elles n'ont qu'un intérêt de curiosité. Il n'en est pas de même de celles dont je vais maintenant parler.

Il y a d'abord les *solutions périodiques.* Ce sont celles où les distances des trois corps sont des fonctions périodiques du temps; à des intervalles périodiques, les trois corps se retrouvent donc dans les mêmes positions relatives. Les solutions périodiques sont de plusieurs sortes. Dans celles que j'ai
130 appelées de la première sorte, les inclinaisons sont nulles et les trois corps se meuvent dans un même plan; les excentricités

sont très petites et les orbites sont presque circulaires ; les moyens mouvements ne sont pas commensurables ; les deux planètes passent en même temps au périhélie, qui, loin d'être fixe, tourne avec une rapidité comparable a celle des planètes elles-mêmes, de telle façon que ces deux astres sont au périhélie à chaque conjonction. C'est à cette catégorie qu'appartient la première solution périodique qui ait été découverte et que son inventeur, M. Hill, a prise pour point de départ de sa théorie de la Lune. 140

Dans les solutions de la seconde sorte, les inclinaisons sont encore nulles, mais les excentricités sont finies ; le mouvement du périhélie est très lent ; les moyens mouvements sont près d'être commensurables ; les périodes anomalistiques (on appelle ainsi le temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs de l'astre au périhélie), le sont exactement. A certaines époques, deux planètes passent en même temps au périhélie. Dans les solutions de la troisième sorte les inclinaisons sont finies, les orbites sont presque circulaires ; le mouvement des périhélies est très lent et égal à celui des nœuds ; les périodes anomalistiques 150 sont commensurables ; à certaines époques les planètes passent en même temps aux périhélies. Je laisse de côté de nombreuses catégories de solutions périodiques plus compliquées et qu'il serait trop long d'énumérer.

Il y a ensuite les *solutions asymptotiques*. Pour bien faire comprendre ce qu'on doit entendre par là, qu'on me permette d'employer un exemple simple. Imaginons d'abord une Terre et un Soleil isolés dans l'espace, se mouvant par conséquent d'après les lois de Képler. Supposons encore pour simplifier, que leur mouvement soit circulaire. Donnons maintenant à cette Terre 160 deux satellites L_1 et L_2 dont la masse sera infiniment petite de telle sorte qu'ils ne troubleront pas le mouvement circulaire de la Terre et du Soleil, et qu'ils ne se troubleront pas non plus mutuellement, chacun d'eux se mouvant comme s'il était seul. Choisissons la position initiale de L_1 de façon que cette Lune décrive une orbite périodique ; nous pourrons alors choisir celle de L_2 de façon que ce second satellite décrive ce que nous appellerons une orbite asymptotique. D'abord assez éloignée de

L_1, il s'en rapprochera indéfiniment, de sorte qu'après un temps
170 infiniment long, son orbite différera infiniment peu de celle de L_1. Supposons un observateur placé sur la Terre et tournant lentement sur lui-même de façon à regarder constamment le Soleil. Le soleil lui paraîtra immobile et la Lune L_1 dont le mouvement est périodique, lui semblera décrire une courbe fermée C. La Lune L_2 décrira alors pour lui une sorte de spirale dont les spires de plus en plus serrées se rapprocheront indéfiniment de la courbe C. Il y a une infinité de pareilles orbites asymptotiques. L'ensemble de ces orbites forme une surface continue S qui passe par la courbe C et sur laquelle sont
180 tracées les spires dont je viens de parler.

Mais il y a une autre catégorie de solutions asymptotiques. Il peut arriver, si l'on choisit convenablement la position initiale de L_2, que cette Lune aille en s'éloignant de L_1, de telle façon qu'à une époque très reculée dans le passé, son orbite diffère très peu de celle de L_1. Pour notre observateur, ce satellite décrira encore une courbe en spirales dont les spires se rapprocheront indéfiniment de la courbe C; mais il la décrira en sens contraire en s'éloignant constamment de C. L'ensemble de ces nouvelles orbites asymptotiques formera une seconde surface
190 continue S' passant egalement par la courbe D.

Enfin il y a une infinité de solutions *doublement asymptotiques*; c'est là un point que j'ai eu beaucoup de peine à établir rigoureusement. Il peut arriver que le satellite L_2, d'abord très s'en rapproche de l'orbite de L_1, s'en éloigne d'abord beaucoup et s'en rapproche ensuite de nouveau indéfiniment. A une époque très reculée dans le passé, cette Lune se trouvait sur la surface S', et y décrivait des spires en s'éloignant de C; elle s'est ensuite beaucoup éloignée de C; mais dans un temps très long elle se retrouvera sur la surface S et décrira de nouveau des spires en se
200 rapprochant de C.

Soient L_2, L_3 . . ., L_n, $n-1$ lunes décrivant des orbites doublement asymptotiques; à une époque reculée, ces $n-1$ lunes se meuvent en suivant des spirales sur S'; en parcourant cette surface on rencontre ces $n-1$ orbites dans un certain ordre. Au bout d'un temps très long, nos satellites se retrouve-

ront sur S et décriront de nouveau des spirales ; mais, en parcourant cette surface S, on rencontrera les orbites des $n-1$ lunes *dans un ordre tout différent.* Ce fait, pour peu qu'on prenne la peine d'y réfléchir, semblera une preuve éclatante de la complexité du problème des Trois corps et de l'impossibilité de 210 le résoudre avec les instruments actuels de l'Analyse.

III

L'astronomie ne nous offre aucun exemple d'un système de trois ou de plusieurs corps dont les conditions initiales du mouvement soient telles qu'ils décrivent exactement des orbites périodiques ou asymptotiques. D'ailleurs *a priori* la probabilité pour que cette circonstance se présentât était manifestement nulle. On ne peut pas en conclure que les considérations précédentes ne sont intéressantes que pour le géomètre et inutiles à l'astronome. Il peut arriver, en effet, et il arrive quelquefois que les conditions initiales du mouvement diffèrent peu de celles 220 qui correspondent à une solution périodique. L'étude de cette solution présente alors un double intérêt.

D'abord, le plus souvent, le mouvement de l'astre présentera une inégalité dont le coefficient sera très grand, mais très peu différent de ce qu'il serait si l'orbite était rigoureusement périodique. Le calcul de cette solution périodique fournira alors ce coefficient plus rapidement et plus exactement que les méthodes anciennes. C'est ce qui est arrivé dans la théorie de la Lune de M. Hill pour le calcul de cette grande inégalité appelée variation.

En second lieu, l'orbite périodique peut être prise comme 230 première approximation, comme « orbite intermédiaire » pour employer le langage de M. Gylden. La seconde approximation conduit alors à un calcul relativement facile, parce que les équations sont linéaires et à coefficients périodiques. C'est ainsi que M. Hill a calculé le mouvement du périgée et qu'il aurait pu calculer également le mouvement du nœud et la grande inégalité connue sous le nom d'évection.

Je pourrais citer beaucoup d'autres exemples. Un des satellites de Saturne a un mouvement très troublé : son périsa-

240 turne tourne très rapidement ; M. Tisserand a rattaché sa théorie
à l'étude d'une solution périodique de la première sorte. La
même méthode est applicable à une certaine petite planète dont
le moyen mouvement est sensiblement double de celui de
Jupiter et que M. Harzer a étudiée.

Gauss a cru pouvoir affirmer que les mouvements moyens de
Jupiter et de Pallas étaient entre eux exactement dans le rapport
de 7 à 18. Si ses vues venaient à se confirmer, ce qui est
encore douteux, la théorie de Pallas se ramènerait à celle d'une
solution périodique de la seconde sorte.

250 Mais l'exemple le plus frappant nous est fourni par l'étude des
satellites de Jupiter. Les relations qui ont lieu entre leurs
moyens mouvements, et dont la découverte est le plus beau
titre de gloire de Laplace, montrent que leur orbite diffère fort
peu d'une orbite périodique ; en y regardant de près, on voit que
la méthode spéciale créée par le génie de ce grand géomètre ne
diffère pas de celle que nous préconisons ici.

IV

Les équations différentielles du problème des trois corps
admettent un certain nombre d'intégrales qui sont connues
depuis longtemps ; ce sont celles du mouvement du centre de
260 gravité, celles des aires, celle des forces vives. Il était extrêmement
probable qu'elles ne pouvaient avoir d'autres intégrales
algébriques ; ce n'est cependant que dans ces dernières années
que M. Bruns a pu le démontrer rigoureusement. Mais on peut
aller plus loin ; en dehors des intégrales connues, le problème
des trois corps n'admet aucune intégrale analytique et uniforme ;
les propriétés des solutions périodiques et asymptotiques,
étudiées avec attention, suffisent pour l'établir. On peut en conclure
que les divers développements proposés jusqu'ici sont
divergents ; car leur convergence entraînerait l'existence d'une
270 intégrale uniforme.

Dirai-je pour cela que le problème est insoluble ? ce mot n'a
pas de sens ; nous savons depuis 1882 que la quadrature du
cercle est impossible avec la règle et le compas, et pourtant nous

connaissons π avec beaucoup plus de décimales que n'en pourrait donner aucune construction graphique. Tout ce que nous pouvons dire, c'est que le problème des trois corps ne peut être résolu avec les instruments dont nous disposons actuellement; ceux qu'il faudra imaginer et employer pour obtenir la solution devront certainement être très différents et d'une nature beaucoup plus compliquée.

V

Une des questions qui ont le plus préoccupé les chercheurs est celle de la stabilité du système solaire. C'est à vrai dire une question mathématique plutôt que physique. Si l'on découvrait une démonstration générale et rigoureuse, on n'en devrait pas conclure que le système solaire est éternel. Il peut en effet être soumis à d'autres forces que celle de Newton, et les astres ne se réduisent pas à des points matériels. Bien des causes peuvent dissiper peu à peu l'énergie du système; on n'est pas absolument certain qu'il n'existe pas de milieu résistant; d'autre part les marées absorbent de l'énergie qui est incessament convertie en chaleur par la viscosité des mers, et cette énergie ne peut être empruntée qu'à la force vive des corps célestes. De plus si tous les astres sont des aimants comme la terre, leurs mouvements doivent produire, par une induction mutuelle, des courants dans leur masse et par conséquent de la chaleur qui est encore empruntée qu'à la force vive des corps célestes. De plus si tous les astres sont des aimants comme la terre, leurs mouvements doivent produire, par une induction mutuelle, des courants dans leur masse et par conséquent de la chaleur qui est encore empruntée à leur force vive. Mais toutes ces causes de destruction agiraient beaucoup plus lentement que les perturbations, et si ces dernières n'étaient pas capables d'en altérer la stabilité, le système solaire serait assuré d'une existence beaucoup plus longue. La question de la stabilité conserve donc toujours un très grand intérêt.

Lagrange, par une démonstration d'une admirable simplicité, a montré que, si l'on néglige les carrés des masses, les grands axes des orbites demeurent invariables, ou plutôt que leurs varia-

tions se réduisent à des oscillations périodiques d'amplitude
310 finie autour de leur valeur moyenne. Poisson a étendu la démonstration au cas où l'on tient compte des carrés des masses en négligeant leurs cubes ; mais, malgré la virtuosité analytique dont il a fait preuve, son analyse montre déjà les défauts des anciennes méthodes. Il montre en effet que les grands axes éprouvent autour de leur valeur moyenne des oscillations périodiques ; mais, d'après ces formules, l'amplitude de ces oscillations pourrait croître au delà de toute limite ; ce n'est là qu'une apparence due au mode de développement, et si l'on ne négligeait pas certains termes, on pourrait prouver que cette amplitude
320 reste finie. Après Poisson on a cherché à trouver une démonstration générale ou au moins à établir l'invariabilité des grands axes en tenant compte du cube des masses. Mathieu avait cru un instant y réussir ; mais M. Spiru-Aretu a montré ensuite qu'il s'était trompé. Il avait ainsi plutôt condamné les anciennes méthodes que démontré l'instabilité du système. La question restait entière.

Toutes ces recherches ont exigé de grands efforts qui nous semblent aujourd'hui bien inutiles ; les méthodes de M. Gylden et celle de M. Lindstedt ne donnent en effet, si loin que
330 l'on pousse l'approximation, que des termes périodiques, de sorte que tous les éléments des orbites ne peuvent éprouver que des oscillations autour de leur valeur moyenne. La question serait donc résolue, si ces développements étaient convergents. Nous savons malheureusement qu'il n'en est rien.

Incapables pour le moment de résoudre le problème général, nous pouvons nous borner à un cas particulier. Imaginons trois masses se mouvant dans un même plan, la première très grande, la seconde assez petite, la troisième infiniment petite et par conséquent hors d'état de troubler les deux autres. Supposons de
340 plus que les deux grandes masses aient un mouvement circulaire et uniforme. Tel serait le cas du Soleil, de Jupiter et d'une petite planète, si l'on négligeait l'inclinaison des orbites et l'excentricité de Jupiter. Dans ce cas, MM. Hill et Bohlin ont démontré que le rayon vecteur de la petite planète reste toujours inférieur à une limite finie.

Cela ne suffit pas toutefois pour la stabilité ; il faut encore que la petite masse repasse une infinité de fois aussi près que l'on veut de sa position initiale.

Il est évident qu'il n'en est pas ainsi pour toutes les solutions particulières, c'est-a-dire quelles que soient les conditions initiales 350 du mouvement ; l'existence des solutions asymptotiques en est une preuve suffisante. Mais d'autre part on peut rigoureusement démontrer que l'on peut choisir ces conditions initiales de façon que l'astre repasse une infinité de fois dans le voisinage de sa position primitive. Il y a donc une infinité de solutions particulières qui sont instables, au sens que nous venons de donner à ce mot et une infinité d'autres qui sont stables. J'ajouterai que les premières sont exceptionnelles (ce qui permet de dire qu'il y a stabilité en général). Voici ce que j'entends par là, car ce mot par lui-même n'a aucun sens. Je veux dire qu'il y a une 360 probabilité nulle pour que les conditions initiales du mouvement soient celles qui correspondent à une solution instable. On objectera qu'il y a une infinité de manières de définir cette probabilité ; mais cela reste vrai quelle que soit la définition que l'on adopte, à une condition toutefois : soient x et y les coordonnées de la troisième masse, x' et y' les composantes de sa vitesse. J'appelle P $dx\, dy\, dx'\, dy'$ la probabilité pour que x soit compris entre x_0 et x_0+dx, y entre y_0 et y_0+dy, x' entre x_0' et $x_0'+dx'$, y' entre y'_0 et y'_0+dy'. Nous pouvons définir la probabilité comme nous le voulons et par conséquent nous donner arbi- 370 trairement P en fonction de x_0, y_0, x'_0 et y'_0. Eh bien, le résultat que j'ai énoncé plus haut reste vrai, quelle que soit cette fonction P, *pourvu qu'elle soit continue.*

H. Poincaré,
de l'Académie des Sciences.

Revue Générale des Sciences,
15 *Janvier* 1891.

V. BOTANIQUE.

Fleur en Général.

La *fleur*, dans les Végétaux *phanérogames*, est un assemblage de plusieurs *verticilles* (ordinairement 4), constitués par des feuilles diversement transformées, et disposés les uns au-dessus des autres en anneaux ou étages, tellement rapprochés que leurs entre-nœuds ne sont pas distincts.

Les feuilles constituant chaque verticille ou anneau floral ne naissent pas toujours rigoureusement à la même hauteur; elles se succèdent souvent en spirale surbaissée, et conséquemment ne forment pas toujours un *verticille vrai*: on a néanmoins con-
10 servé le nom de *verticille* pour désigner le calyce, la corolle, l'androcée et le pistil.

La *fleur* peut être regardée comme un véritable bourgeon situé à l'extrémité du pédoncule ou du pédicelle: ce bourgeon est donc *terminal* relativement au rameau dont il émane, puisqu'il met un terme à la végétation de ce rameau.

Si la *fleur* termine toujours son *axe*, on peut penser que cela vient de ce que cet axe, épuisé par la déperdition des sucs qu'absorbent les verticilles floraux, n'a plus la force végétative qui serait nécessaire pour sa prolongation. Dans le développement
20 normal de la *fleur*, la force reproductive fait équilibre à la force de nutrition; mais il arrive des cas où cet équilibre est rompu, et où l'*axe*, c'est-à-dire le *pédoncule*, s'allonge au-delà des verticilles floraux, et reproduit la Plante par des bourgeons-branches, en faisant ordinairement avorter les bourgeons-graines; c'est ce qu'on voit dans beaucoup de Végétaux, et notamment dans les *Roses* dites *prolifères*, dont le pédoncule se prolonge en axe supplémentaire, lequel s'éteint ordinairement dans une seconde

fleur imparfaitement formée de sépales, de pétales, au milieu desquels se trouvent quelques étamines et carpelles avortés.

Nous avons dit que les verticilles constituant la *fleur* se composent de *feuilles* diversement transformées : ces feuilles, modifiées dans leur tissu, leur couleur, leur consistance pour former le *calyce*, la *corolle*, l'*androcée* et le *pistil*, révèlent quelquefois leur nature originelle en se montrant à l'observateur sous l'aspect de feuilles vertes ordinaires.—On nomme *anomalies* ou *monstruosités* les altérations accidentelles que subit un Végétal ou un Animal, et qui l'éloignent de la structure habituelle des individus de son Espèce : c'est surtout la culture qui provoque ces modifications. 30

Le premier verticille ou *calyce*, étant le plus extérieur, c'est-à-dire le plus voisin des feuilles, est aussi celui qui leur ressemble le plus. 40

Le deuxième verticille, ou *corolle*, subit des modifications plus considérables ; le tissu de ses feuilles s'est raffiné, leur couleur est plus éclatante ; mais l'*onglet*, le *limbe*, les *nervures*, et la forme, ordinairement plane, des *pétales* rappellent encore les feuilles ordinaires.

Le troisième verticille, ou *androcée*, offre une grande analogie avec le second : la position des *étamines* et des *pétales* est toujours la même, et leur transformation réciproque s'opère quelquefois dans une même fleur par des transitions insensibles : c'est ce qu'on voit dans les fleurs *semi-doubles*, où une partie des étamines se sont métamorphosées en pétales ; dans les fleurs *doubles*, où toutes les étamines ont subi la métamorphose, et dans les fleurs *pleines*, où les carpelles ont imité les étamines (*Renoncules*, *Ancolies*, *Roses*). C'est surtout dans les *Roses* dites à *cent feuilles*, qu'on peut remarquer les gradations successives par lesquelles l'étamine devient pétale : tantôt l'anthère élargit et colore en rose une de ces loges ; tantôt elle les allonge toutes deux ; tantôt le connectif s'épanouit en lame rose, et porte sur l'un de ses côtés une écaille jaune qui rappelle une loge anthérique ; le plus souvent l'étamine s'élargit franchement en pétale complet ; quelquefois enfin le voisinage du calyce exerce sur ce pétale une sorte d'influence contagieuse : une 50 60

nervure médiane verte vient traverser son limbe coloré, et il se montre sépale sur son milieu et pétale sur ses côtés.—Dans l'*Ancolie double* c'est l'anthère qui se boursoufle, et forme un pétale creusé en capuchon; quelquefois c'est le filet qui se dilate, et forme un pétale plane; mais ce dernier cas est moins
70 fréquent dans l'*Ancolie* que le premier.

Le quatrième verticille, ou *pistil*, est le plus intérieur; cette situation centrale et la pression des organes environnants l'exposent à des altérations diverses, et surtout à des soudures, qui déguisent son origine; mais, quand les feuilles carpellaires sont libres entre elles (*Ancolie*), ou solitaires (*Pois*), leur nature foliacée est facile à reconnaître, et c'est surtout dans les cas d'anomalie qu'on peut la constater. Nous en citerons quelques exemples.

Fleurs Incomplètes.—La fleur est *incomplète* (*flos incompletus*),
80 quand elle ne possède pas à la fois calyce, corolle, androcée et pistil.—On nomme *périanthe* ou *périgone* (*perianthium*, *perigonium*) l'enveloppe simple ou double, de feuilles verticillées, qui entoure l'androcée et le pistil, lesquels constituent essentiellement la *fleur*.

La *fleur dipérianthée* (*fl. dichlamydeus*) est celle qui possède un périanthe double, c'est-à-dire deux verticilles bien distincts, formant un calyce et une corolle (*Giroflée*). Le *périanthe double* a quelquefois ses verticilles, soit *concolores*, soit *conformes*, c'est-à-dire présentant le même aspect, soit pour la couleur, soit pour
90 la forme. Dans ce cas, le périanthe est dit: 1° *calycoïde* ou *foliacé* (*perigonium foliaceum*), quand il a l'aspect d'un double calyce (*Rumex*);—2° *pétaloïde* (*perig. petaloideum*), quand il a l'aspect d'une double corolle (*Lis*). Dans les *Narcisses* le périanthe pétaloïde offre en dedans une espèce de godet frangé: ce godet, très développé dans l'Espèce commune, ici figurée, l'est beaucoup moins dans le Narcisse odorant à fleur blanche, et autres Espèces, où il se montre découpé en six lobes qui alternent avec les pièces du double périanthe, d'où quelques Botanistes ont conclu qu'il représente deux verticilles analogues
100 aux extérieurs, mais très rapprochés et soudés intimement.

D'autres Botanistes regardent le godet des *Narcisses* comme formé par des expansions latérales des filets d'étamines, qui se sont soudées en tube.—Dans les *Orchis*, le périanthe pétaloïde a six lobes inégaux, profondément séparés, dont les supérieurs se recouvrent, et ont reçu le nom de *casque* (*galea*) ; l'inférieur est étalé, de forme très variable, et a reçu le nom de *labelle* (*labellum*) ou *tablier* ; il se prolonge quelquefois en un sac nommé *éperon* (*calcar*).

La fleur *monopérianthée* est celle dont le périanthe est *simple* (*perigonium simplex*), c'est-à-dire formé d'un verticille unique. 110 Le périanthe simple est ordinairement nommé *calyce*, et la fleur est dite alors *apétale* (*flos apetalus*). Il est tantôt *foliacé* (*Chénopode*), tantôt *pétaloïde* (*Anémone*) : quelquefois il est irrégulier (*Aristoloche*).

La fleur *apérianthée* (*flos achlamydeus*) est celle qui n'a ni calyce, ni corolle ; elle est tantôt protégée par une ou plusieurs bractées (*Carex*), tantôt *nue* (*fl. nudus*), c'est-à-dire sans périanthe, ni bractées (*Frêne*).

La fleur est dite *stamino-pistillée* (*fl. hermaphroditus*) quand elle possède *androcée* et *pistil* (*Giroflée*) : on la désigne par ☿ ; 120 —*staminée* (*fl. masculus*) quand elle est pourvue d'un androcée sans pistil (*Carex*) : on la désigne par ♂ ;—*pistillée* (*fl. fœmineus*), quand elle est pourvue de pistil sans androcée (*Carex*) : on la désigne par ♀ ;—*neutre* ou *stérile* (*fl. sterilis, neuter*) quand elle ne possède ni androcée ni pistil (fleurs extérieures du *Bleuet*).

Les fleurs sont dites *monoïques* (*fl. monoici*), quand les fleurs *staminées* et les fleurs *pistillées* habitent la même Plante (*Carex*, *Chêne*, *Noisetier*, *Arum*) ;—*dioïques* (*fl. dioici*), quand les fleurs *staminées* naissent sur une Plante et les *pistillées* sur une autre (*Saule*, *Mercuriale*) ;—*polygames* (*fl. polygami*), quand, parmi les 130 fleurs *monoïques* ou *dioïques*, se trouvent mêlées des fleurs *stamino-pistillées* (*Pariétaire*).—Les fleurs, soit *monoïques*, soit *dioïques*, soit *polygames*, sont dites aussi *diclines* (*fl. diclines*).

CALYCE.

Le *calyce* (*calyx*) est le verticille situé en dehors de la corolle

et de l'androcée. Il est ordinairement *simple* (*Giroflée*), quelquefois *multiple* (*Magnolia, Trolle*). Les feuilles qui le composent sont nommées *sépales* (*sepala*).

Le calyce est dit *polysépale* (*c. polysepalus*), lorsque ses feuilles sont libres de toute cohérence entre elles (*Giroflée*) ;—*monosépale* 140 (*c. monosepalus, gamosepalus*), lorsque ses feuilles sont plus ou moins complètement cohérentes, de manière à figurer un calyce d'une seule pièce.

Le calyce monosépale est dit *partit* (*c. partitus*), quand les sépales sont presque libres et se soudent à la base seulement: alors il est dit, selon le nombre des découpures, *bipartit, tripartit, quadripartit, quinquépartit, multipartit*, etc. (*bipartitus, tripartitus, quadripartitus, quinquepartitus, multipartitus*, etc.) (*Mouron*) ;—*fendu* (*fissus*), quand les sépales se soudent jusqu'à moitié, ou à peu près : alors il est dit, selon le nombre des découpures, *bifide,* 150 *trifide, quadrifide, quinquéfide, multifide* (*bifidus, trifidus, quadrifidus, quinquefidus, multifidus*, (*Consoude, Érythrée*) ;—*denté* (*dentatus*) quand la soudure se prolonge presque jusqu'au sommet des sépales: alors il est dit, selon le nombre des dents, *bidenté, tridenté, quadridenté, quinquédenté*, etc. (*bidentatus, tridentatus, quadridentatus, quinquedentatus*, etc.) (*Lychnis*).

On nomme *tube* (*tubus*), dans le calyce monosépale, la partie où la cohérence des sépales s'est opérée; *limbe* (*limbus*), la partie où les sépales sont restées libres; *gorge* (*faux*), l'endroit où la soudure se termine.

160 Le calyce monosépale porte quelquefois au-dessus de son attache des prolongements ou *appendices*: c'est ce qu'on voit dans les *Myosures*, dans les *Pensées*, dont les cinq sépales sont attachés au réceptacle par le milieu de leur longueur; dans la *Campanule carillon* : entre chaque couple de sépales, descend un appendice résultant de la soudure de deux lobes qui appartiennent à deux sépales différents.

Le calyce est *régulier* (*cal. regularis, æqualis*), quand ses sépales, soit égaux, soit inégaux, forment un verticille symétrique (*Giroflée, Mouron, Érythrée, Lychnis*).—Le calyce est 170 *irrégulier* (*c. irregularis, inæqualis*), quand ses sépales ne forment pas un verticille symétrique (*Lamier*). Dans l'*Aconit*, le sépale

supérieur se creuse en casque; dans les *Dauphinelles*, le sépale supérieur se prolonge en cornet creux ou *éperon*. Dans la *Capucine*, l'éperon est formé par les prolongements soudés des trois sépales supérieurs. Dans les *Pélargonium*, le sépale supérieur se prolonge sur le pédicelle, et forme un tube soudé avec cet organe. Dans les *Scutellaires*, les cinq sépales du calyce figurent deux lèvres, dont la supérieure forme d'abord une saillie qui, après la fleuraison, se creuse en bouclier à son milieu et se recourbe sur les ovaires qu'elle coiffe et enveloppe 180 complètement, en se joignant à la lèvre inférieure.

Le tube du *calyce* monosépale est dit *cylindrique* (*cylindricus*), quand il est long, rond et d'égale grosseur partout (*Œillet*) ;—*cupuliforme* (*cupuliformis*), quand il ressemble à une coupe ou à un godet (*Oranger*) ;—*claviforme* (*claviformis*), quand il ressemble à une massue (*Silénê arméria*) ;—*vésiculeux* (*vesiculosus*), quand il ressemble à une vessie gonflée (*Alkékenge*) ;—*turbiné* (*turbinatus*), quand il ressemble à une toupie ou à une poire (*Bourdaine*) ;—*campanulé* (*campanulatus*), quand il ressemble à une cloche (*Haricot*) ;—*urcéolé* (*urceolatus*), quand il ressemble 190 à un grelot (*Jusquiame*).

Le calyce est dit *connivent* (*sepala conniventia*) quand les sépales s'inclinent dans la fleur les uns vers les autres (*Ceanothus*) ;—*clos* (*c. clausus*), quand les sépales, quoique distincts, se touchent par leurs bords (*Giroflee*) ;—*dressé* (*c. erectus*), quand les sépales sont dirigés verticalement de bas en haut (*Roquette*) ;—*étalé* (*c. patens*), quand les sépales sont dirigés à peu près horizontalement (*Moutarde*) ;—*réfléchi* (*c. reflexus*) quand les sépales se renversent en arrière, de manière à montrer en dehors leur face interne (*Renoncule bulbeuse*). 200

Le limbe du calyce est tantôt *pétaloïde* (*Iris*) ;—tantôt *foliacé* *Cognassier* ;—tantôt *denté* (*Fédia*) ;—tantôt réduit à une petite couronne membraneuse (*Camomille des champs*) ;—tantôt usé et réduit à un petit bourrelet circulaire (*calycis margo obsoletus*) (*Garance*) ;—tantôt *nul* (*Chrysanthème*) : dans ce dernier cas, le calyce est dit *entier* (*c. integer*), parce qu'on admet que son tube est soudé avec l'ovaire et ne se divise pas en limbe.

Le limbe du calyce dégénère quelquefois en *écailles* (*squamæ*)

ou en *paillettes* (*paleæ*) (*Hélianthe*), ou en *soies* ou en *poils*,
210 formant une *aigrette* rayonnante (*pappus*). L'*aigrette* formée par le limbe dégénéré du calyce est dite *plumeuse* (*pappus plumosus*), quand chacun de ses poils rayonnants est couvert de petits poils secondaires ou de barbelures visibles à l'œil nu (*Valériane*); *Salsifis*;—*simple*(*pappus simplex*), quand les *poils* ou *soies* sont dépourvus de duvet ou de barbelures latérales, et qu'ils offrent à l'œil nu l'apparence de poils ou soies, unis à leur surface.

L'*aigrette*, soit *simple*, soit *plumeuse*, est dite *sessile* (*p. sessilis*), quand les poils ou soies naissent immédiatement du sommet de l'ovaire (*Bleuet*, *Valériane*);—*stipitée* (*p. stipitatus*), quand le
220 tube du calyce est prolongé en un col grêle au-dessus de l'ovaire (*Salsifis*, *Scabieuse*).

Le calyce, quant à sa durée, est dit *tombant* (*c. deciduus*), lorsqu'il tombe avec la corolle après la fleuraison (*Giroflée*);—*caduc* ou *fugace* (*c. caducus*), lorsqu'il tombe dès que la fleur commence à s'épanouir (*Coquelicot*);—*persistant* (*c. persistens*), lorsqu'il reste en place, même après la fleuraison (*Mouron*);—*marcescent*, lorsque, en persistant, il se fane et se dessèche (*Mauve*);—*accrescent* (*c. accrescens*), lorsque, en persistant, il prend de l'accroissement (*Alkékenge*).

Corolle.

230 La *corolle* (*corolla*) est le verticille placé en dedans ou au-dessus du calyce; elle est ordinairement *simple* (*Rose*), quelquefois *multiple*, c'est-à-dire composée de plusieurs verticilles (*Magnolia*, *Nymphæa*); ses feuilles sont nommées *pétales* (*petala*).

Les pétales sont *colorés*, c'est-à-dire d'une couleur autre que la verte: c'est ce qui les distingue des sépales, qui ont généralement un aspect foliacé: cependant quelques Plantes (*Nerprun*, *Vigne*, *Narcisse viridiflore*) ont des pétales verts, de même que, par compensation, les *Hellébores*, les *Aconits*, les *Dauphinelles*, les *Ancolies*, les *Nigelles* ont des sépales colorés, c'est-à-dire
240 pétaloïdes.

La corolle *polypétale* ou *dialypétale* (*c. polypetala*, *dialypetala*) est celle dont les feuilles sont libres entre elles de toute cohérence (*Giroflée*, *Fraisier*, *Ancolie*).—La corolle *monopétale* ou *gamo-*

pétale (*c. monopetala*, *gamopetala*) est celle dont les feuilles sont cohérentes plus ou moins complètement, de manière à former une corolle d'une seule pièce.

La corolle est dite *régulière* (*c. regularis*), quand ses pétales, libres ou soudés, sont égaux, et forment un verticille symétrique; *irrégulière* (*c. irregularis*), dans le cas contraire.—Une corolle peut offrir des pièces inégales, et être régulière : c'est lorsque les 250 grandes et les petites alternent entre elles en nombre égal, que les petites sont semblables aux petites, et les grandes aux grandes : elle est encore *régulière* lorsque ses pièces sont irrégulières, mais toutes semblables : il en résulte un ensemble symétrique (*Pervenche*).

Corolle Polypétale.—Le pétale de la corolle polypétale est dit *onguiculé* (*petalum unguiculatum*), quand il est rétréci à sa base en une sorte de pétiole qu'on nomme *onglet* (*unguis*) (*Giroflée, Œillet*) ; la partie élargie porte le nom de *lame* (*lamina*) ; le pétale est courtement onguiculé dans la *Rose*, la 260 *Renoncule* ; il est *sessile* dans le *Seringat*, l'*Oranger*.

L'*onglet* du pétale est dit *nectarifère* (*unguis nectarifer*), quand il porte une glande sécrétant une liqueur sucrée (*Renoncule*) ; tantôt la glande est protégée par une écaille, tantôt elle est nue (*Berbéris*).—L'onglet est dit *nu* (*u. nudus*), quand il ne porte ni glande ni écaille ; c'est le cas le plus ordinaire (*Giroflée*, *Œillet*) ;—il est dit *ailé* (*u. alatus*), quand il porte, perpendiculairement à sa face interne, des bandelettes qui s'étendent jusqu'à la *lame* (*Coquelourde des blés*).—On nomme *fornices* (*fornices*) de petites excavations situées à la limite 270 extérieure de l'onglet et de la lame et faisant saillie à l'intérieure (*Lychnis de Calcédoine*). Nous verrons la corolle monopétale offrir aussi quelquefois des fornices.—On nomme *coronule* (*coronula*) une ou plusieurs lamelles placées intérieurement au sommet de l'onglet, et formant par l'ensemble des pétales une *couronne*, qui entoure l'androcée et le pistil (*Lychnis dioïque*, *Réséda*).

La *lame* du pétale est tantôt *entière* (*Giroflée*), tantôt *dentelée* ou *frangée* (*Œillet*) ; tantôt *bifide*, *trifide*, *quatrifide*, etc. (*Lychnis*), tantôt terminée par une *crête* déchiquetée (*Réséda*). 280

Les pétales sont généralement *planes* (*petala plana*) comme les feuilles ;—quelques-uns sont *concaves* (*p. concava*) (*Berbéris*); *tubuleux* (*p. tubulosa*), c'est-à-dire creusés en un tube dont l'orifice a son bord à peu près entier (*Hellébore fétide*) ;—*bilabiés* (*p. bilabiata*), c'est-à-dire formant un tube dont l'orifice présente deux lèvres distinctes (*Nigelle*, *Eranthis*) ;—*unilabiés* (*p. labiata*), quand le tube se termine par une lèvre unique (*Trolle*) ;—*cuculliformes* ou *en capuchon* (*p. cuculliformia*) (*Ancolie, Aconit*); —*calcariformes* (*p. calcariformia*), c'est-à-dire en éperon ou en
290 cornet (*Pensée*, *Dauphinelle*).—Les pétales creux, quelle que soit leur forme, renferment généralement au fond de leur cavité une glande qui distille du nectar à l'époque où la fleur s'épanouit, et où les anthères s'ouvrent pour laisser échapper le pollen.

La corolle polypétale *régulière* est dite *cruciforme* (*c. cruciformis*), quand elle se compose de quatre pétales, opposés deux à deux, en croix (*Roquette*, *Chélidone*) ;—*rosacée* (*rosacea*), quand elle se compose de cinq pétales à onglet court ou nul, et ouverts (*Rose*, *Fraisier*) ;—*caryophyllée* (*c. caryophyllea*), lorsqu'elle se compose de cinq pétales munis d'onglets (*Lychnis*).

300 La corolle polypétale *irrégulière* est dite *papilionacée* (*c. papilionacea* (*Cytise*), quand elle se compose de cinq pétales, dont un supérieur, nommé *étendard* (*vexillum*), est adossé à l'axe, et embrasse les quatre autres, deux latéraux, nommés *ailes* (*alæ*), recouvrant eux-mêmes les deux inférieurs, qui sont rapprochés, soudés souvent ensemble par leur bord inférieur, et dont la réunion se nomme *carène* (*carina*).

La corolle *irrégulière*, sans être papilionacée, es dite *anomale* (*c. anomala*) (*Aconit*, *Pélargonium*, *Pensée*).

ANDROCÉE.

L'*androcée* (*androceum*) est le verticille, *simple* ou *multiple*,
310 placé en dedans ou au-dessus de la corolle ; les feuilles qui le constituent sont nommées *étamines* (*stamina*).

L'*étamine*, à l'état le plus complet, se compose d'un pétiole nommé *filet* (*filamentum*), et d'un limbe nommé *anthère* (*anthera*); l'anthère est partagée en deux moitiés latérales par une nervure

médiane nommée *connectif* (*connectivum*), chaque moitié forme une *loge* (*loculus*) ; chaque loge est formée de deux feuillets ou *valves*, dont la jonction est marquée par un sillon ou *suture* extérieure. Le *dos* est le côté de l'anthère qui regarde la corolle ; la *face* est le côté qui regarde le pistil.

Le parenchyme ou tissu cellulaire interposé entre les deux 320 feuillets de l'anthère, avait, dans la jeunesse de l'organe, ses cellules molles, succulentes et adhérant les unes aux autres ; mais, quand arrive l'époque de ses fonctions, ce parenchyme devient sec et pulvérulent ; les deux feuillets se décollent le long de leur suture ; la loge s'ouvre, et les cellules, devenues *pollen*, en sortent pour adhérer au stigmate.

L'anthère est rarement *sessile*, c'est-à-dire dépourvue de filet (*Arum*).

Quand la corolle est monopétale, les étamines sont soudées avec elle (*Belladone*) : cette loi générale offre très-peu d'excep- 330 tions (*Bruyère*, *Campanule*).

Insertion des étamines.—On nomme *insertion* ou *point de départ* des étamines, la partie de l'axe floral où elles se séparent des verticilles voisins. L'insertion des pétales est toujours la même que celle des étamines : conséquemment, dans la corolle monopétale staminifère, l'insertion des étamines sera déterminée d'après celle de la corolle.

Les étamines, ainsi que la corolle, sont dites *hypogynes* (*st. hypogvna*), quand elles sont libres d'adhérence avec le pistil et avec le calyce, et qu'elles naissent du réceptacle au-dessous de 340 la base du pistil (*Renoncule*, *Primevère*) ;—*périgynes* (*st. perigyna*), lorsqu'elles s'insèrent sur le calyce, et se trouvent élevées à une certaine hauteur au-dessus de la base du pistil, de sorte que, relativement au pistil, elles sont latérales, au lieu d'être inférieures (*Abricotier*, *Campanule*) ;—*épigynes* (*st. epigyna*), lorsqu'elles s'insèrent sur le pistil même (*Cornouillier*, *Garance*).

Les insertions *périgynique* et *épigynique* étant souvent peu distinctes et faciles à confondre, on a nommé *calyciflores* (*Pl. calcyifloræ*) les Plantes à corolle (soit monopétale, soit polypétale) et à étamines insérées sur le calyce, que ce calyce soit au-dessous 350 de l'ovaire, comme dans l'*Abricotier*, ou supérieur à l'ovaire,

comme dans la *Campanule*, le *Cornouillier*, la *Garance*.—On a nommé *thalamiflores* (*pl. thalamifloræ*) les Plantes à corolle polypétale et à étamines insérées au-dessous du pistil, c'est-à-dire *hypogynes* (*Renoncule*) ; on a nommé *corolliflores* (*pl. corollifloræ*) les Plantes à corolle monopétale staminifère insérée au-dessous du pistil, c'est-à-dire *hypogyne* (*Primevère*).

Déhiscence.—La *déhiscence*, c'est-à-dire la séparation des feuillets de chaque loge, est dite *longitudinale* (*anthera rimâ*
360 *longitudinali dehiscens*), quand elle se fait de haut en bas, ou de bas en haut (*Giroflée*, *Campanule*) ;—*transversale* (*a. transversim dehiscens*), quand elle se fait horizontalement, ce qui arrive surtout dans les anthères uniloculaires (*Alchimille*) ; la déhiscence est *apicale* (*a. apice dehiscens*) dans les *Morelles*, où les deux sutures, au lieu de s'ouvrir dans toute leur longueur, ne s'ouvrent que dans le haut, près du sommet du connectif ;—la déhiscence est dite *valvaire* (*a. valvulâ dehiscens*), lorsque l'un des feuillets de chaque loge se détache tout d'une pièce : dans le *Berbéris*, le feuillet postérieur se déchire près du connectif et se soulève
370 élastiquement comme un panneau ; dans les *Lauriers*, le feuillet antérieur en fait autant ; dans quelques autres *Lauriers* à anthère quadriloculaire, la déhiscence se fait par quatre panneaux.

Pollen.—Le *pollen* offre des formes différentes selon les Espèces, mais sa forme est invariable dans une même Espèce : la plus générale est celle d'un ellipsoïde ou d'un sphéroïde ; les grains sont quelquefois *polyédriques*, quelquefois *triangulaires* (*Onagre*) ; leur surface est tantôt *lisse*, tantôt *mamelonnée*, ou *épineuse* (*Rose-trémière*), tantôt *réticulée*, etc.

Le grain de pollen, mûr, se compose généralement de deux
380 membranes, dont l'une, extérieure, est doublée intérieurement par la seconde : celle-ci contient une matière nommée *fovilla*, et formée d'un liquide épais et de granules nombreux, souvent mêlés à des gouttelettes d'huile : la *fovilla* est l'élément essentiel du pollen.

La structure des grains de pollen peut facilement s'observer lorsqu'on provoque leur déhiscence en les plaçant dans l'humidité : cette déhiscence résulte de l'inégale extensibilité des deux membranes : quand le grain de pollen est humecté, sa membrane

interne, qui est plus extensible que l'externe, force celle-ci de lui donner passage.—La déhiscence s'opère généralement sur 390 des points déterminés : la membrane externe présente des *amincissements* formant des *plis* vers l'intérieur, ou des *ponctuations*, qu'on regarde comme des *pores* ; dans la plupart des cas, la membrane repliée se gonfle, le pli disparaît, les ponctuations ou pores se prononcent davantage, et la membrane externe se rompt dans les portions amincies ; la membrane interne devenue libre sort par les ouvertures sous forme d'une petite ampoule nommée *tube pollinique* : bientôt, distendue elle-même de plus en plus, elle se crève à son tour, et laisse échapper la fovilla, qui forme un jet irrégulier. Quelquefois les amincissements sont 400 circulaires, et circonscrivent une espèce de calotte ou de couvercle nommé *opercule,* qui se détache, poussé par la membrane interne (*Melon*).

Le pollen des *Cerisiers* et de l'*Onagre* s'ouvre par trois *pores* donnant passage à trois ampoules ; le pollen du *Melon* opère sa déhiscence par le soulèvement de six couvercles en forme de disques, lesquels s'ouvrent comme autant de portes, ou sont complètement décollés et emportés par le tube pollinique ; le pollen du *Pin* a une membrane externe, qui se sépare en deux hémisphères par suite de la distension de la membrane interne. 410 Le pollen du *Polygala* resemble à un petit baril, dont les douves, constituées par la membrane externe, s'écartent en fentes longitudinales pour laisser sortir la membrane interne.

Le pollen des *Orchis*, au lieu d'être pulvérulent comme dans tous les cas précédents, se compose de deux *masses* (*massæ pollinicæ*) cireuses, soutenues par deux pédicules, de consistance élastique, nommés *caudicules* (*caudiculi*) et portés eux-mêmes sur une base glanduleuse aplatie, nommée *rétinacle* (*retinaculum*) ; ces masses présentent une suite de petits corps anguleux, unis, par un réseau élastique, continu avec le caudicule : chaque corps 420 est formé par quatre grains de pollen, on le nomme *massule* (*massula*) ; chaque grain de pollen est formé d'une membrane unique, et s'allonge en un long tube contenant la *fovilla*.—Le *rétinacle* appartient à la partie antérieure du style ; il sécrète un suc glutineux qui s'avance vers les grains de pollen, lesquels

sont originairement libres, la liqueur s'infiltre entre ces grains, les unit entre eux, puis se solidifie, et devient un réseau qui porte les grains, et un pédicule qui porte le réseau.

Le pollen des *Asclépias* est très analogue à celui des *Orchis*: 430 les cinq anthères biloculaires sont introrses, et s'appliquent contre les côtés d'un stigmate à cinq angles arrondis: chaque loge renferme une masse de pollen compacte, dont les grains sont pourvus d'une seule membrane, et se tiennent intimement unis: à chaque angle du stigmate, entre chaque paire d'étamines naissent deux petits corps visqueux (*rétinacles*); de ces petits corps partent deux rigoles qui descendent vers les anthères et aboutissent aux deux loges contiguës de deux anthères voisines; dans ces rigoles découle une substance molle et visqueuse, qui prend sa source dans les rétinacles, et parvient aux *masses* 440 polliniques; bientôt les deux petits corps s'unissent, se solidifient; la matière molle émanée d'eux se solidifie aussi, et devient un double filet qui, en se concrétant, tire à lui les deux masses polliniques qu'il a happées, et qui appartiennent à deux anthères différentes: ces deux masses, extraites de leurs loges, restent suspendues aux filets, comme les plateaux d'une balance sont suspendus à leur fléau.

Pistil.

Le *pistil* ou *gynécée* (*pistillum*, *gynœceum*) est le verticille qui couronne le réceptacle et occupe le centre de la fleur, dont il termine la végétation, comme la fleur, dans son ensemble, 450 termine la végétation du rameau floral.

Le pistil, dans la plupart des cas, est posé immédiatement sur le *réceptacle* ou sommité évasée du pédoncule: dans quelques cas, l'entre-nœud qui lui donne naissance s'allonge, devient distinct, et forme un support qu'on nomme *gynophore* (*gynophorum*): le pistil est dit alors *stipité* (*Fraxinelle*, *Rue*).

Les feuilles composant le pistil se nomment *carpelles* (*carpella*, *carpidia*): leur nombre varie; les carpelles forment tantôt un verticille simple (*Sédum*, *Ancolie*, *Pigamon*); tantôt un verticille multiple (*Trolle*); tantôt le carpelle est unique, par suite de

l'avortement de ceux qui, dans l'état normal de la fleur, devraient 460
lui correspondre (*Baguenaudier*, *Pêcher*). Dans certaines circonstances, vis-à-vis du carpelle unique se développent un ou plusieurs carpelles, qui complètent un verticille: c'est ce qu'on observe quelquefois sur le *Cerisier*, qui présente alors deux carpelles; sur quelques *Mimosa*, qui en présentent trois ou cinq, etc.—Le pistil est dit *monocarpellé*, quand le carpelle est unique; *polycarpellé*, quand il y en a plusieurs.

Dans le pistil très jeune, chaque carpelle se présente sous la forme d'une petite écaille arrondie ou acuminée, plus ou moins étalée; plus tard, ses bords se rapprochent graduellement l'un 470
de l'autre, finissent par se toucher, et forment une cavité close; ou bien, au lieu de se rapprocher l'un de l'autre, ils se soudent avec les bords des carpelles voisins; on voit ensuite les bords de la feuille carpellaire (ou quelquefois même la surface da sa paroi interne) couverts de petits corps arrondis qui y sont attachés immédiatement ou par l'intermédiaire d'un cordon: ces corps arrondis sont nommés *ovules*, et doivent plus tard devenir des *graines*; le bord ou la surface portant les ovules se nomme *placentaire*; le cordon qui unit l'ovule au placentaire se nomme *funicule*; le limbe de la feuille carpellaire est l'*ovaire*; la partie 480
supérieure de ce limbe, quand elle forme un prolongement rétréci, devient le *style*; l'extrémité, ou sommet, de forme variable, et toujours d'un tissu différent, est le *stigmate*.

Dans le pistil polycarpellé les carpelles sont: 1° libres entre eux de toute cohérence (*carpella distincta*) (*Ancolie Pigamon*, *Hellébore*); 2° cohérents par leurs ovaires, tantôt à la base seulement, tantôt jusqu'au milieu (*Nigelle*), tantôt jusqu'au sommet (*Lin*, *Stellaire*); 3° cohérents par leurs ovaires et leurs styles (*Cactus*, *Lis*); 4° cohérents par leurs ovaires, styles et stigmates, de manière à simuler un carpelle unique (*Primevère*, 490
Pensée); 5° cohérents par leurs styles et stigmates seulement, et libres par leurs ovaires (*Pervenche*, *Asclépias*).

Les Botanistes modernes, respectant l'ancien langage de la science, ont continué de nommer *ovaire* l'organe collectif formé par la réunion de plusieurs ovaires soudés et constituant ainsi un *ovaire composé*; ils ont également nommé *style*, *stigmate*,

placentaire, la réunion des *styles*, *stigmates*, *placentaires*, soudés ensemble et appartenant à plusieurs carpelles.

Quand les ovaires sont libres entre eux, chacun replie ses 500 bords vers le centre de la fleur, et les réunit de manière à circonscrire une cavité, close de toutes parts; ces bords, ainsi rapprochés, forment un placentaire, simple en apparence, mais double en réalité, qui souvent, à la maturité du fruit, se décolle en deux placentaires partiels, chargés de graines (*Ancolie*, *Sédum*). —Les carpelles, dans quelques cas très rares (*Pin*, *Sapin*, *Cyprès*, *Thuya*), restent étalés et libres de toute cohérence: plus tard, ils se juxtaposent, s'unissent les uns aux autres par leurs surfaces, mais sans soudure, et forment ainsi des cavités closes où les graines sont abritées.

510 L'ovaire, soit simple, soit composé, est dit *libre* ou *supère* (*ovarium liberum*, *ovarium superum*) quand il n'adhère avec aucun des organes voisins (*Lychnis*, *Primevère*). Il est dit *infère* (*ov. inferum*) quand, au lieu d'être situé au-dessus de l'androcée, de la corolle et du calyce, il semble leur être inférieur, tout en conservant sa position centrale (*Myrte*).

La plupart des Botanistes modernes ont expliqué cette disposition en admettant que l'ovaire paraît infère, parce qu'il est soudé avec le tube du calyce. Cette théorie sur l'adhérence mutuelle du calyce et de l'ovaire a prévalu dans la première 520 moitié du dix-neuvième siècle, et les expressions d'*ovaire adhérent au calyce*, de *calyce adhérent à l'ovaire*, ont été employées dans toutes les Flores et dans tous les ouvrages didactiques. Mais l'étude plus attentive du développement des organes a montré que, dans les fleurs à ovaire dit *infère*, la partie jusqu'à présent considérée comme un calyce à tube adhérent, est une expansion cupuliforme du réceptacle, qui a enchâssé avec adhérence l'ovaire dans sa cavité, et que le calyce ne commence qu'au point où naissent les étamines et les pétales. Ainsi, ce qu'on a nommé *tube calycinal adhérent à l'ovaire* doit être 530 désigné sous le nom de *tube* ou *cupule réceptaculaire*.—Nous reviendrons sur cette question en parlant du *torus*.

L'ovaire est *demi-adhérent* (*o. semi-adhærens*), lorsqu'il n'adhère qu'incomplètement au tube réceptaculaire (*Saxifrage*).

Dans l'ovaire composé (qu'il soit libre ou qu'il soit infère), les ovaires partiels s'accolent ensemble de diverses manières : 1° ils se touchent bord à bord (*Groseillier*, *Réséda*, *Orchis*, *Cactus*) et alors leur réunion est indiquée par une couple de placentaires appartenant à deux carpelles différents ; dans ce cas les placentaires sont dits *pariétaux* (*placentæ parietales*), et l'ovaire composé, ne formant qu'une seule cavité ou *loge*, est dit 540 *uniloculaire* (*ovarium uniloculare*) ; 2° ils se replient de manière à former des lames verticales, composées chacune de deux feuillets accolés, et appartenant à deux carpelles différents : ces lames sont nommées *cloisons* (*septa*, *dissepimenta*) ; les cloisons sont *incomplètes* si elles ne s'avancent pas jusqu'au centre de la fleur de manière à se joindre toutes ensemble : dans ce cas, encore, les placentaires sont dits *pariétaux*, et l'ovaire, *uniloculaire* (*Erythrée*, *Pavot*) les cloisons sont *complètes* si elles s'avancent les unes vers les autres, de manière que leurs bords rentrants forment un faisceau fibreux au centre de la fleur ; à 550 ce faisceau s'ajoute souvent un prolongement du réceptacle, qui forme alors ce qu'on a nommé *columelle* (*columella*) (*Mauve*, *Tulipe*, *Campanule*) ; cette columelle, soit qu'elle émane du réceptacle, soit que, suivant la loi générale, elle appartienne aux placentaires, contribue nécessairement au transport des sucs qui montent vers les carpelles, et fournissent de la nourriture aux ovules.

Dans ce cas de cloisons complètes, il y a autant de loges que de carpelles, et l'ovaire composé est dit, selon le nombre de loges, *biloculaire*, *triloculaire*, *quadriloculaire*, *quinquéloculaire*, 560 ou d'une manière générale, *pluriloculaire* (*Ovarium biloculare*, *triloculare*, *quadriloculare*, *quinqueloculare*, *pluriloculare*). Les placentaires sont alors dits (*placentæ centrales*, *placentatio centralis*) et se montrent réunis par paires, appartenant chacune à un même carpelle.

Les cloisons sont formées généralement par l'endocarpe des carpelles, et une expansion du mésocarpe qui s'est interposé entre les deux lames endocarpiques.

On a nommé *fausses-cloisons* (*dissepimenta spuria*) des lames, soit verticales, soit horizontales, qui ne sont pas formées par la 570

soudure des faces rentrantes de deux carpelles contigus : dans les *Astragales* le carpelle unique est presque partagé en deux loges par une lame verticale provenant d'un repli de la face dorsale qui fait saillie à l'intérieur ; le même effet a lieu dans l'ovaire composé des *Lins*, qui a dix cloisons, dont cinq émanent chacune de la nervure médiane d'un carpelle et s'avancent vers l'axe, qu'elles n'atteignent pas toujours. Dans les *Datura*, dont le pistil se compose de deux carpelles soudés, l'ovaire est à quatre loges, parce que les faces rentrantes de chaque carpelle,
580 après s'être portées jusqu'au centre de la fleur, se replient du centre à la circonférence, et s'avancent vers la nervure médiane, laquelle, de son côté, fournit un prolongement qui s'unit à la double lame venue du centre, et complète avec elle une cloison portant un placentaire sur chacune de ses deux faces. Au sommet de l'ovaire, les cloisons accessoires disparaissent, et l'on ne voit que deux loges.—Dans la *Giroflée*, et autres Plantes de la même Famille, deux carpelles sont appliqués l'un contre l'autre ; le long des deux bords de chacun règne un faisceau fibreux, portant des graines, ce qui fait, pour chaque côté, un
590 ourlet composé de deux faisceaux juxtaposés ; au total, quatre placentaires disposés deux à deux ; l'intérieur est partagé en deux loges par une fausse cloison, fine et demi-transparente, à laquelle les placentaires servent en quelque sorte de châssis. Cette cloison est regardée comme une dépendance des placentaires : elle se montre, dans le jeune âge, composée de quatre lames, qui naissent par paires de chaque paire de placentaires et s'avancent l'une vers l'autre, du dehors au dedans, jusqu'à ce qu'elles aient opéré leur jonction ; plus tard, cette fausse cloison paraît formée d'un feuillet unique ; mais elle offre dans son milieu
600 la trace de jonction des lames émanées des placentaires, c'est-à-dire un amincissement longitudinal, facile à diviser sans déchirement.

Dans les *Coronilles* et les *Casses*, le carpelle jeune offre une cavité unique, qui plus tard se subdivise en logettes superposées, et séparées par des cloisons provenant du parenchyme de l'ovaire, lequel s'est étendu horizontalement entre les graines.

Symétrie de la Fleur.

Le terme de *symétrie* a été diversement interprété par les auteurs : selon De Candolle, la symétrie est la *régularité* non géométrique des corps organisés, c'est-à-dire des Végétaux et des Animaux ; d'autres Botanistes établissent entre la *symétrie* et la *régularité* des distinctions, souvent fort confuses, que nous 610 n'admettrons pas ; nous regarderons donc *symétrie* et *régularité* comme étant synonymes, et signifiant un rapport de similitude entre les feuilles qui constituent les verticilles de la fleur ; ce rapport comprenant : 1° la *forme*, 2° le *nombre*, 3° l'*indépendance*, 4° la *position relative* des parties, nous reconnaîtrons dans la fleur des Végétaux phanérogames quatre sortes de symétries : la *symétrie de forme*, la *symétrie de nombre*, la *symétrie de disjonction* et la *symétrie de position*.

La *symétrie de forme* est la régularité prise dans son sens le plus ordinaire : elle a lieu lorsque les pièces d'un même verticille 620 sont toutes semblables entre elles, ou bien lorsque, étant dissemblables, les unes alternent avec les autres, de manière à offrir un ensemble symétrique autour d'un centre commun : on pourrait donner à cette régularité le nom de *symétrie rayonnante*. Le calyce et la corolle de l'*Ancolie*, de la *Giroflée*, des *Renoncules* en offrent un exemple.—Lorsque le verticille ne présente pas cet aspect symétrique, il est dit *irrégulier* ; mais alors il offre deux moitiés collatérales semblables, ce qui constitue une symétrie analogue à celle des Animaux, et qu'on pourrait appeler *symétrie longitudinale*, pour la distinguer de la *symétrie rayonnante* qui 630 appartient aux fleurs régulières, de même qu'aux Animaux inférieurs nommés *Rayonnés* ou *Zoophytes*. La corolle de la *Pensée*, du *Cytise*, de la *Capucine*, offre un exemple d'*irrégularité*, c'est-à-dire de symétrie longitudinale.

Le verticille est encore dit *régulier*, lors même qu'il n'est qu'*apparent*, et qu'il forme une spirale surbaissée ; mais si l'axe floral s'allonge notablement, la symétrie rayonnante disparaît, et l'on se contente, pour décrire l'organe, d'énoncer la forme plus ou moins allongée de la spirale : ainsi l'ensemble des carpelles

640 est *hémisphérique* dans le *Fraisier*, *conique* dans la *Framboise*, en *épi* dans l'*Adonide*.

La *symétrie de nombre* est complète, quand tous les verticilles ont le même nombre de pièces.

Dans les *Crassula*, le *calyce*, la *corolle*, l'*androcée*, le *pistil* offrent un exemple de la symétrie de nombre : il y a cinq sépales, cinq pétales, cinq étamines et cinq carpelles.

La *symétrie de disjonction* a lieu quand les pièces de chaque verticille ne contractent aucune *cohérence*, et que chaque verticille est libre de toute *adhérence* : l'*Ancolie*, les *Hellébores*, en offrent 650 un exemple.

La *symétrie de position* a lieu lorsque chaque verticille *alterne* avec les pièces des verticilles qui le précèdent ou qui le suivent, et que rien ne déguise la superposition normale des verticilles, qui doit observer l'ordre suivant, de bas en haut : *calyce*, *corolle*, *androcée*, *pistil*.—Le *Crassula rubens* en offre un exemple.

Beaucoup de Botanistes modernes, considérant que la régularité de la fleur est le cas le plus général, ont cru reconnaître dans cette régularité un *type primitif* adopté par la Nature : ils regardent en conséquence la réunion des diverses symétries que 660 nous venons d'indiquer comme l'état normal de la fleur dans les Végétaux phanérogames. La fleur normale est donc pour eux un ensemble de quatre verticilles composés d'un même nombre de feuilles, égales entre elles, libres de toute cohérence et de toute adhérence, alternant avec celles des deux verticilles voisins, et disposées de manière que le calyce forme le premier verticille, ou le plus externe, la corolle le second, l'androcée le troisième, et le pistil le quatrième, ou le plus intérieur. Ce type primitif, tantôt visible aux yeux, tantôt concevable par l'esprit, peut être modifié d'une manière constante et plus ou moins complètement, 670 par diverses causes, séparées ou combinées : parmi ces causes, les principales sont : l'*inégalité de développement*, les *soudures* ou *symphyses*, les *multiplications*, les *dédoublements*, les *suppressions* et les *avortements*. Cette théorie, tout hypothétique qu'elle puisse être, a contribué au progrès de l'organographie, en perfectionnant l'analyse comparative des organes floraux.

Pour se rendre compte du degré de symétrie que présente une

fleur, il faut l'observer à l'état de bouton, et en tracer une coupe horizontale, comme si tous les verticilles étaient privés de hauteur, et abaissés sur un même plan; on saisit ainsi d'un coup d'œil tous les rapports des diverses parties de la fleur: 680
cette coupe théorique est nommée *diagramme.*

FRUIT.

Le fruit (*fructus*) est le pistil fécondé et mûr, c'est-à-dire renfermant des graines capables de germer et de reproduire la Plante. Le fruit est quelquefois accompagné d'organes accessoires, que l'on considère comme faisant partie intégrante du fruit, et sur lesquels nous reviendrons.

Le fruit est *apocarpé*, 1° quand les carpelles qui le composent sont libres entre eux (*Ancolie*); *Renoncule*, *Ronce*, *Rose*, et alors chaque carpelle est considéré comme un fruit; 2° quand le pistil se compose d'un carpelle unique (*Pois*, *Baguenaudier*, *Abricotier*, 690
Froment).—Il est dit *syncarpé*, quand les carpelles qui le composent sont soudés en un corps unique (*Lis*, *Iris*, *Campanule*, *Pavot*, *Pensée*).

Le nombre des graines est important à noter dans le fruit: selon le nombre des graines renfermées dans chaque carpelle libre, ou dans chaque loge du fruit syncarpé, ou dans un ovaire composé uniloculaire, ce carpelle, cette loge, cet ovaire composé sont dits uniséminés (*monosperma*) s'ils ne contiennent qu'une graine; pauciséminés (*oligosperma*) s'ils en contiennent quelques-unes; multiséminés (*polysperma*) s'ils en contiennent un grand 700
nombre.

On a donné le nom de *péricarpe* (*pericarpium*) à l'ovaire mûr; nous avons déjà fait connaître les trois couches qui le composent, savoir: la pellicule extérieure, nommée *épicarpe* (*epicarpium*), la pellicule intérieure, nommée *endocarpe* (*endocarpium*), et la couche intermédiaire, formée de fibres et de parenchyme, nommée *mésocarpe* (*mesocarpium*) ou *sarcocarpe* (*sarcocarpium*).

Changements causés par la Maturation.—Le fruit, en mûrissant, subit des changements dont quelques-uns ont déjà été mentionnés: tantôt il est *sec*, et alors il est dit, selon sa con- 710

sistance, *membraneux*, *subéreux*, *coriace*, *ligneux*, *osseux:* ce dernier cas s'observe dans la *noisette* et le *gland;* tantôt il devient *charnu* par l'abondance des sucs qui affluent pour favoriser la maturation des graines: ces sucs sont désignés sous le nom de *pulpe;* dans la *Belladone*, c'est le mésocarpe qui devient succulent; dans l'*orange*, ce sont des cellules allongées, en forme de fuseau, fixées à l'endocarpe par l'une de leurs extrémités, et libres par l'autre; dans la *tomate*, c'est le placentaire; dans la *groseille* et la *grenade*, c'est le *testa* même de la graine.

720 Dans le fruit à mésocarpe succulent du *Prunier*, du *Cerisier*, du *Pêcher*, de l'*Abricotier*, du *Noyer*, etc., l'endocarpe s'épaissit aux dépens d'une portion du mésocarpe, acquiert une consistance osseuse, et forme ce qu'on nomme le *noyau* (*putamen*).

Les cloisons peuvent quelquefois disparaître dans le péricarpe: c'est ce qu'on voit dans le *Lychnis* et autres *Caryophyllées*, où le rapide accroissement des parois les brise et les efface; dans le *Chêne*, où celui des ovules qui doit réussir étouffe les cinq autres, et refoule les trois cloisons; dans le *Frêne*, où l'une des deux loges renferme une graine, tandis que l'autre est réduite à une 730 cavité presque imperceptible par refoulement de la cloison.

Quelquefois, dans l'ovaire, à mesure qu'il mûrit, se développent des cloisons transversales, qui ne sont que des prolongements horizontaux de l'endocarpe et du mésocarpe, lesquels peuvent quelquefois devenir ligneux, comme on le voit dans les *Casses*. Dans les *Cneorum* et les *Tribules*, l'endocarpe et le mésocarpe se prolongent graduellement de la paroi vers le centre en cloisons obliques, qui à la maturité partagent le fruit en logettes superposées.

Les lames membraneuses qui séparent transversalement en 740 logettes le fruit du *Radis*, de la *Ravenelle* et de quelques autres *Crucifères*, apartiennent à la cloison longitudinale, que l'accroissement des graines a fait dévier à droite et à gauche, en refoulant l'endocarpe: dans ce cas, le fruit s'ouvre par séparation transversale des logettes, dont chacune contient une graine.

Sutures.—On a nommé *suture ventrale* (*sutura ventralis*) la ligne indiquant la jonction des deux bords soudées d'une feuille carpellaire: cette suture regarde l'axe de la fleur; ce qu'on

nomme assez improprement la *suture dorsale* (*s. dorsalis*) n'est autre chose que la nervure médiane du carpelle : elle regarde, par conséquent, la périphérie de la fleur. Cette nervure peut 750 être masquée par le parenchyme développé du carpelle, comme dans la *Pêche* ; elle est indiquée ordinairement, soit par une côte saillante (*Ancolie*), soit par un sillon (*Astragale*). La suture ventrale peut aussi être indiquée, soit par une côte (*Pois*), soit par un sillon (*Pêche*). Dans l'ovaire pluriloculaire, les sutures ventrales, occupant le centre de la fleur, ne peuvent être vues à l'extérieur, et chaque loge est indiqué par une ligne ou côte dorsale : en outre on voit ordinairement, sur la paroi de l'ovaire composé et entre les lignes dorsales, d'autres sutures, nommées *pariétales* (*suturæ parietales*) qui indiquent la jonction de deux 760 cloisons ou de deux placentaires pariétaux (*Mauve*).

Dans les ovaires infères, ce ne sont pas des sutures qu'on observe sur la paroi du fruit, mais des nervures appartenant au tube du calyce suivant les uns, au tube réceptaculaire suivant les autres (*Groseillier*). Dans ce cas, souvent le limbe du calyce accompagne aussi le fruit, sous la forme de *dents* (*Fédia*), ou de *soies* (*Scabieuse*), ou de *couronne* (*Grenadier*, *Nèfle*).

Organes Accessoires.—Le style persiste quelquefois sur l'ovaire, et grandit avec le péricarpe pendant la maturation : il représente un bec aplati dans les *Radis*, dans les *Roquettes* ; une 770 queue plumeuse dans les *Pulsatilles* et les *Clématites*.

Le réceptacle, par les adhérences qu'il contracte dans certains cas avec l'ovaire, appartient nécessairement au fruit ; tel est le tube réceptaculaire qui enchâsse les carpelles dans les *pommes*, les *poires*, les *coings*, les *nèfles*, les *alises*, les *azeroles*, le fruit de l'*Aubépine*, etc. ; tel est aussi le réceptacle du *Fraisier*, qui, d'abord peu charnu, se gorge bientôt de sucs, augmente de volume, déborde les ovaires, et les enchâsse dans son parenchyme, lequel prend peu à peu une couleur pourprée ; ce n'est donc pas seulement le pistil, c'est surtout le réceptacle développé que l'on 780 mange dans la *fraise*, et qui est regardé communément comme le fruit : les ovaires de la *fraise* sont insipides et craquent sous la dent, et ces petits fils noirâtres qui se déposent au fond du vin où l'on a plongé les *fraises*, sont les styles desséchés. Tel

est encore, dans le *Figuier*, le réceptacle commun, charnu, dans lequel sont renfermées un grand nombre de petites fleurs, les inférieures pistillées ou femelles, et les supérieures staminées ou mâles.

Classification.—Beaucoup d'auteurs ont travaillé à la classifi-
790 cation des fruits, et leurs travaux, tout en fournissant à la science de précieuses observations, ont jeté quelquefois de la confusion dans le langage de la Botanique.—Linnæus admettait sept espèces de fruits ; Gœrtner, treize ; Mirbel en a établi vingt et une ; Desvaux, quarante-cinq : Richard, vingt-quatre ; M. Dumortier, trente-trois ; M. Lindley, trente-six. La classification suivante, empruntée à ces divers auteurs, nous a paru la plus simple et la plus commode dans l'application : elle comprend la plupart des modifications de forme qu'on observe dans les fruits des Végétaux *phanérogames*.

800 Les fruits apocarpés sont : 1° le *follicule*, 2° le *légume*, 3° la *drupe simple*, 4° la *baie simple*, 5° l'*akène*, 6° le *caryopse*.—Les fruits syncarpés sont : 7° la *capsule* et ses variétés, 8° la *baie* et ses variétés, 9° la *drupe composée* ou *nuculaine*.

Fruits Apocarpés.—1° le *follicule* (*folliculus*) est un fruit sec, déhiscent, à plusieurs graines, s'ouvrant par sa suture ventrale (*Caltha*, *Dauphinelle*, *Pivoine*), ou, ce qui est très rare, par sa suture dorsale (*Magnolia*). Les *follicules* sont rarement solitaires ; ils forment presque toujours un verticille (*Ancolie*, *Pivoine*, *Caltha*), ou ils s'agglomèrent en tête (*Trolle*).

810 2° Le *légume* ou *gousse* (*legumen*) est un fruit sec, déhiscent, ordinairement à plusieurs graines, s'ouvrant en deux valves par ses sutures dorsale et ventrale (*Pois*). Quelques *Légumineuses* ont leur fruit tordu en spirale (*Luzerne*) ; d'autres, un fruit à une seule graine et indéhiscent, qui n'est plus un légume, mais bien un véritable *akène* (*Trèfle*) ; d'autres ont leur fruit *lomentacé* (*fr. lomentaceus*), c'est-à-dire que le légume est rétréci de distance en distance, et divisé en logettes par des cloisons transversales, qui se dédoublent à la maturité ; le fruit se sépare en autant d'articles, dont chacun renferme une graine (*Coronille*, *Sainfoin*) ;
820 d'autres enfin ont une gousse partagée en deux loges longitudi-

nales plus ou moins complètes, par inflexion, soit de la face dorsale (*Astragale*), soit de la suture ventrale (*Oxytropis*).

3° La *drupe* (*drupa*) est un fruit indéhiscent, ordinairement à graine unique, à mésocarpe charnu et à endocarpe durci en noyau (*Pêcher*, *Cerisier*, *Abricotier*, *Prunier*, *Amandier*, *Noyer*).—Les *drupéoles* sont de petites drupes, ordinairement agglomérées (*Framboisier*, *Ronce*).

4° La *baie simple* ne diffère de la *baie composée* que par son carpelle unique (*Berbéris*, *Arum*).

5° L'*akène* ou *achaine* (*akenium*) est un fruit sec, indéhiscent, 830 à graine unique n'adhérant pas au péricarpe. Les *akènes* sont les solitaires dans le *Bleuet*; agglomérés dans les *Renoncules*, *Anémones*, les *Roses*, le *Fraisier*.—L'*utricule* (*utriculus*) est une variété de l'achaine, dont le péricarpe est très-mince et presque membraneux (*Scabieuse*, *Amarante*, *Statice*).

6° Le *caryopse* (*caryopsis*) est un fruit sec, indéhiscent, à graine unique adhérant au péricarpe (*Froment*, *Maïs*, *Avoine*).

Fruits Syncarpés.—7° La *capsule* (*capsula*) est un fruit syncarpé, sec, à une ou plusieurs loges, et déhiscent.—La capsule *pluriloculaire* offre une déhiscence *septicide* dans le *Millepertuis*, la 840 *Scrofulaire*, la *Molène*, le *Colchique*, la *Salicaire*; *loculicide* dans le *Lilas*, le *Lis*, l'*Iris*; *septifrage* dans le *Datura*; *septicide* et *loculicide* dans la *Digitale*, le *Lin cathartique*.—La capsule *uniloculaire* a ses valves placentifères sur leurs bords dans la *Gentiane*; placentifères sur le milieu dans la *Pensée*, le *Saule*.—La capsule de l'*Orchis* s'ouvre en trois valves placentifères sur leur milieu, et les nervures médianes des trois carpelles restent en place, réunies par leur base ainsi que par leur sommet, sur lequel persistent les enveloppes florales desséchées.

La déhiscence est transversale dans les *Plantains*, le *Mouron*, 850 le *Pourpier*, la *Jusquiame*; cette variété de capsule se nomme *pyxide* (*pyxidium*, *capsula circumscissa*).

Dans le *Réséda*, la capsule, dont les stigmates sessiles formaient au-dessus de l'ovaire des lobes anguleux, connivents, écarte ses lobes sans se diviser en dents ou en valves, et reste béante.—Dans la *Primevère*, la capsule s'ouvre au sommet en cinq valves incomplètes, par division des nervures dorsales.—Dans l'*Œillet*,

la capsule s'ouvre au sommet en quatre valves incomplètes, par division de la nervure dorsale et des sutures pariétales.—Dans le
860 *Lychnis*, la capsule s'ouvre de la même manière en dix valves incomplètes.—Dans les *Pavots*, la capsule s'ouvre par de petites valvules situées entre les cloisons, au-dessous de la calotte formée par les lames styliques et les crêtes stigmatiques.—Dans la *Campanule carillon*, la capsule s'ouvre par des valvules qui se voient au bas des faces séparant les cinq côtes du tube réceptaculaire : ces ouvertures viennent de ce que les cloisons se sont décollées de l'axe central dans leur partie inférieure ; l'effort qu'elles font pour se courber de bas en haut emporte avec elles une portion de l'ovaire, qui figure ainsi au dehors une petite porte ouverte.
870 —Dans d'autres Espèces de *Campanule*, la déhiscence s'opère tout différemment ; c'est à la partie supérieure, auprès du limbe calycinal, qu'elle a lieu ; le bord de la cloison s'est épaissi en cet endroit, et forme un ourlet dont la concavité est en dehors ; le bas de cet ourlet s'enroule sur sa concavité, et déchire la paroi de l'ovaire ; on le voit alors formant entre chaque sépale une petite saillie arrondie, et les graines sortent librement par les orifices placés au niveau de leurs placentaires.—Dans le *Muflier*, le carpelle supérieur, c'est-à-dire celui qui est du côte de la tige, et qui s'élève au-dessus du niveau de son correspondant, s'ouvre
880 près du style, en soulevant de petites plaques qui circonscrivent un trou ; le carpelle inférieur, qui est renflé à sa base, s'ouvre en soulevant de petites plaques qui circonscrivent deux trous collatéraux. La déhiscence se fait donc par trois orifices entourant le style qui a persisté. L'ensemble du fruit, vu sens dessus dessous, représente une figure grotesque, ayant pour nez le style, pour bouche le trou du carpelle supérieur, pour yeux les deux autres trous, et pour coiffure le calyce, qui a persisté comme le style.

La *silique* (*siliqua*) est une capsule à deux carpelles quelquefois uniloculaire (*Chélidoine*), ordinairement divisée en deux
890 loges par une fausse cloison membraneuse, et s'ouvrant de bas en haut en deux valves qui laissent en place les placentaires pariétaux, chargés de graines (*Giroflée*). La silique prend le nom de *silicule* (*silicula*), quand sa longueur n'excède pas de beaucoup sa largeur (*Drave*, *Cochléaria*, *Thlaspi*).

Dans quelques cas, la *silique* est *lomentacée*, et se sépare trans-

versalement en articles renfermant chacun une graine (*Radis*). Dans le *Bunias*, chacune des deux loges de la *silicule* renferme deux graines et est partagée en deux compartiments ou logettes par des replis de la cloison longitudinale.—Dans les *Crambés*, la silicule s'étrangle de manière à figurer deux logettes inégales super- 900 posées, contenant chacune une graine; mais celle de la logette supérieure se développe, tandis que la graine de la logette inférieure, dont le funicule est étranglé dans l'isthme, reste à l'état rudimentaire, et la silicule, réduite à une graine, reste indéhiscente.—Dans le *Myagrum perfoliatum*, la silicule ne contient qu'une graine qui occupe la moitié inférieure et refoule en haut la cloison; les deux loges de la moitié supérieure sont vides.

LE MAOUT ET DECAISNE.

Traité de Botanique.

GRAINE.

La *graine* (*semen*) des Végétaux *phanérogames* est l'*ovule* fécondé, mûr, et apt à la germination; elle renferme une Plante en miniature, nommée *plantule* ou *embryon* (*embryo*, 910 *plantula*, *corculum*), et destinée à reproduire la Plante-mère.

Récapitulons ici l'organisation de l'embryon dans le *Pois*. Il se compose d'une *tigelle* (*cauliculus*, d'une *radicule* (*radicula*), de deux *cotylédons* (*cotyledones*), et d'une *gemmule* ou *plumule* (*gemmula plumula*); cet embryon est renfermé dans une cavité, close de toutes parts, que circonscrit un tégument à double tunique, dont l'externe, nommée *testa* (*testa*) tient par le *hile* (*hilus*, *umbilicus*) au funicule (*funiculus*), lequel naît du placentaire (*placenta*), et dont l'interne, nommée *endoplèvre* (*endoplevra*) donne passage aux sucs nourriciers par la chalaze (*chalaza*) 920 laquelle communique avec le hile au moyen d'un cordon nommée *raphé* (*raphe*). Près du hile, se trouve une petite ouverture nommée *micropyle* (*micropyle*), par laquelle l'ovule reçoit l'action fécondante du pollen.

On peut établir, comme règle générale, que l'extrémité radiculaire de l'embryon répond au micropyle, et que l'extrémité cotylédonaire répond à la chalaze: nous indiquerons les rares exceptions que cette règle subit, sans en être infirmée.

Positions relatives de la graine et de l'embryon. — Il est impor-
930 tant de noter que, dans le premier âge de l'ovule, le hile et la chalaze se correspondent immédiatement; qu'en conséquence le raphé n'existe pas, et que le micropyle occupe l'extrémité opposée, c'est-à-dire l'extrémité libre de l'ovule.

Il faut aussi établir que, 1° la *base* de l'ovaire est le point d'attache de celui-ci sur le réceptacle, et son *sommet* est le point d'où part le style; 2° la *base* de la *graine* est le point par lequel elle tient au funicule ou au placentaire, et qui est indiqué par le hile; le *sommet* de la graine est l'extrémité d'une ligne idéale, droite ou courbe, qui, partant de la base, se continue à égale
940 distance des bords jusqu'à l'extrémité libre de la graine. Cette ligne, allant de la base au sommet, est nommée *axe* de la graine. —L'*axe* de l'ovaire se définit de la même manière. L'embryon a aussi son *axe*, sa *base* et son *sommet* : sa base est indiquée par son extrémité radiculaire, et son sommet par son extrémité cotylédonaire.

Le sommet de la graine est évident toutes les fois que le hile occupe l'une des extrémités du grand diamètre de la graine, ou qu'il est situé près de cette extrémité (*Ortie, Sauge, Chicorée*), ce qui arrive ordinairement; mais quelquefois le hile correspond
950 au milieu du grand diamètre de la graine (*Lychnis*) : on le dit alors *ventral* (*hilus ventralis*), et la graine est dite *déprimée* (*semen depressum*) si elle est aplatie (*Garance*), et *peltée* (*s. peltatum*) si elle est convexe d'un côté et concave de l'autre (*Lychnis, Stellaire*) : dans ce cas, il est difficile et superflu de déterminer le sommet de la graine, mais il est aisé et utile de distinguer le *ventre* ou *face ventrale*, c'est-à-dire le côté qui regarde le placentaire, et le *dos*, ou *face dorsale*, c'est-à-dire le côté opposé.

La graine est dite *dressée* (*f. erectum*), quand sa base correspond à celle de l'ovaire, c'est-à-dire qu'elle est fixée au fond de cette
960 cavité (*Ortie*, *Sauge*).—La graine est dite *ascendante* (*s. ascendens*), lorsque, étant fixée à un placentaire central ou pariétal, son sommet est tourné vers celui de l'ovaire (*Sédum*, *Pommier*).—La graine est dite *inverse* ou *renversée* (*s. inversum*), quand sa base correspond au sommet de l'ovaire, soit que le placentaire se trouve immédiatement au-dessous du style (*Valériane*), soit que,

occupant le fond de l'ovaire, il émette un funicule qui se prolonge vers l'extrémité de l'ovaire, et à l'extrémité duquel pend la graine (*Plumbago*).—La graine est dite *pendante* ou *suspendue* (*s. pendulum*), lorsque, étant fixée à un placentaire central ou pariétal, son sommet est tourné vers la base de l'ovaire (*Abricotier*, *Amandier*). La différence entre les graines *inverses* et les graines *pendantes* est souvent peu tranchée, et beaucoup de Botanistes emploient indistinctement ces deux termes pour qualifier les graines dont l'extrémité libre regarde le fond de l'ovaire.—La graine est dite *horizontale*, lorsque, étant fixée à un placentaire central ou pariétal, son axe se croise à angle droit avec celui de l'ovaire (*Aristoloche*, *Lis*). 970

Dans certains ovaires biovulés l'un des ovules peut être *pendant*, et l'autre *ascendant* (*Marronnier d'Inde*) ; dans d'autres à graines ou ovules nombreux, les uns sont *ascendants*, les autres *pendants*, et ceux du milieu *horizontaux* (*Ancolie*). 980

Tous les termes indiquant les positions de la *graine* s'appliquent pareillement aux positions de l'*ovule*.

Forme et surface des graines.—Les graines sont dites, selon leurs formes diverses, *globuleuses*, *ovoïdes*, *réniformes*, *oblongues*, *cylindriques*, *turbinées*, *aplaties*, *lenticulaires*, *anguleuses*, etc. ; quelques-unes sont fines comme de la sciure de bois et sont dites *scobiformes* (*s. scobiformia*) ; certaines graines aplaties ont leurs bords saillants et épais, et sont dites *marginées* (*s. marginata*) (*Sabline*) ; si cette expansion devient large et membraneuse, elles sont dites *ailées* : telles sont les graines des *Bignonias*, des *Pins*. 990

La surface des graines peut être *lisse* (*s. læve*) (*Ancolie*) ; *ridée* (*s. rugosum*) (*Nigelle*) ; *striée* (*s. striatum*) (*Tabac*), relevée de côtes (*scotatum*) (*Dauphinelle*), ou creusée de sillons ; *réticulée* (c'est-à-dire présentant une sorte de réseau (*Creeson*), *ponctuée* (*s. punctatum*), c'est-à-dire marquée de petites taches et de petits points ; *alvéolée* (*s. alveolatum*), c'est-à-dire creusée de petites fossettes ressemblant aux alvéoles des abeilles (*Coquelicot*) ; *tuberculeuse* (*s. tuberculatum*), c'est-à-dire garnie de petites saillies arrondies (*Stellaire*) ; *aiguillonnées* (*s. aculeatum*), c'est-à-dire hérissée de petites pointes (*Muflier*) ; *glabre* (*Lin*), *chevelue* 1000

(*Cotonnier*).—Quelques graines ont un testa pulpeux (*Groseillier*, *Grenadier*); d'autres sont couvertes de glandes huileuses, souvent disposées en bandelettes (*Angélique*), quelquefois logées dans des fossettes (*Genévrier*).

Le *hile*, point par lequel la graine est attachée au funicule ou au placentaire, forme une cicatrice, enfoncée ou proéminente; au centre ou vers l'un des côtés de cette cicatrice, se trouve
1010 l'*omphalode*, orifice simple ou multiple, très-petit, qui indique le passage des canaux nourriciers du funicule dans la graine.—La *chalaze*, ou hile interne, forme tantôt une proéminence plus ou moins sensible, tantôt une sorte de mamelon, tantôt une simple tache (*Oranger*, *Amandier*).—Le *raphé* ou funicule interne, qui conserve la communication entre le hile et la chalaze séparés par les évolutions de l'ovule, se dessine comme une bandelette le long d'un des côtés de la graine; souvent il se ramifie dans l'épaisseur du testa (*Amandier*, *Oranger*).—Le *micropyle*, qui, dans le jeune ovule, formait une ouverture large et béante, reste
1020 visible sur quelques graines (*Fève*, *Haricot*, *Pois*); il disparaît sur le plus grand nombre, mais on reconnaît la place qu'il a dû occuper, en observant le point où aboutit l'extrémité radiculaire.

Germination.—La germination est l'acte par lequel l'embryon s'accroît, se débarrasse de ses téguments, et finit par se suffire à lui-même en tirant du dehors sa nourriture.

L'extrémité libre de la tigelle, terminée par le mamelon radiculaire, est ordinairement la première partie qui fait saillie au dehors en élargissant l'orifice du micropyle; bientôt la tigelle tout entière se débarrasse de ses enveloppes, avec les
1030 cotylédons et la gemmule nés à son extrémité supérieure; celle-ci s'allonge à son tour, et étale ses petites feuilles en montant vers le ciel; en même temps le mamelon radiculaire s'est développé, et enfoncé de haut en bas dans le sol.

Si la tigelle, c'est-à-dire le premier entre-nœud de la Plante, terminé par les cotylédons, s'allonge tandis que la germination s'opère, les cotylédons sont souléves, et apparaissent au-dessous du sol. On les dit alors *épigés* (*c. epigæi*) (*Haricot commun*, *Radis*, *Tilleul*). Lorsque la tigelle reste très-courte, et que la gemmule formant le second entre-nœud s'allonge rapidement,

les cotylédons restent cachés dans la terre, souvent même 1040
engagés sous les téguments de la graine : on les dit alors *hypogés* (*c. hypogæi*) (*Haricot d'Espagne*, *Chêne*, *Graminées*, *Oranger*).

L'évolution des radicules, chez les *Monocotylédones*, présente une particularité remarquable : elles sont pourvues, à leur base, d'une sorte d'étui (*col*), que l'on nomme *coléorhize* (*coleorhiza*) ; cet étui n'est autre chose qu'une couche cellulaire extérieure qui, n'ayant pu suivre le développement de la radicule, a été percée par elle.

LE MAOUT ET DECAISNE.

Traité de Botanique.

TUBES CRIBLÉS.

La substance particulière, nommée *callose* par M. Mangin, et qui forme le cal des tubes criblés, existe dans les tubes criblés de toutes les Cuscutes Monogynées. Le cal se forme dans les conditions physiologiques ordinaires, c'est-à-dire vers la fin de la période végétative. Dans nos climats, pour les Cuscutes que j'ai cultivées, le cal se forme vers le mois de novembre. Les cribles transverses ou longitudinaux sont recouverts, sur leurs deux faces, de cette substance calleuse formant une couche épaisse et mamelonnée. Sur des coupes transversales de tiges, passant à travers des membranes transverses obliques de tubes 10
criblés, on aperçoit facilement les épaississements calleux. Des cals recouvrent aussi les cribles situés sur les parois longitudinales, et sur des coupes en long et en travers ils forment de chaque côté de la paroi des épaississements proéminents. La callose est répandue aussi, en îlots irréguliers, en couches de plus ou moins grande étendue bouchant les pores isolés. Examinés sans réactifs, les cals tranchent sur les autres membranes par leur grande réfringence. La potasse les dissout très rapidement.

Pendant leur période d'activité, les tubes criblés contiennent des granules réfringents, très petits, arrondis, placés en abon- 20
dance vers les extrémités du tube, et aussi contre les parois. C'est à la partie inférieure des cribles que se trouve la quantité la plus considérable de ces granules. Ils sont plongés au milieu

d'un protoplasme hyalin pariétal. C'est surtout sur des matériaux frais du *Cuscuta japonica* que j'ai étudié cette substance. Dans une coupe placée dans l'eau on voit fréquemment ces globules agités d'un rapide mouvement brownien. Ces globules se colorent par l'iode en rouge vineux, tandis que les grains d'amidon, abondants dans toutes les autres régions de la tige, prennent en même temps, sous l action du réactif, leur couleur bleue caractéristique. Sous un faible grossissement et en coupes longitudinales ou transversales, ces amas rougeâtres, tranchant nettement sur le fond bleu amylacé général, indiquent la position des cribles transverses des tubes criblés. Les tubes criblés ne contiennent donc pas de l'amidon pur, mais une substance amylacée rougissant sous l'influence de l'iode.

Cette substance rougissante représente certainement un état transitoire de l'amidon proprement dit. Des substances analogues, auxquelles on donne quelquefois le nom général d'amylodextrine, ont été rencontrées déjà dans quelques plantes. On les observe dans certains Champignons et dans la plupart des Floridées. Une substance amylacée comparable a été décrite dans l'Ergot du Seigle par M. Belzung. Dans une note postérieure, cet auteur pense que c'est la même formation que M. Erréra a décrite et nommée *glycogène transitoire*. Enfin, des grains rougissants se rencontrent parfois aussi chez les Phanérogames, comme dans les cotylédons en voie de formation et quelques autres organes.

RÉSUMÉ.

Les Cuscutes Monogynées possèdent un important système de laticifères, placés, les uns dans le parenchyme cortical, les autres dans le péricycle. Quelle que soit leur origine ils ne sont jamais reliés entre eux par des anastomoses. Les laticifères corticaux sont de longues cellules superposées en files. Les laticifères péricycliques sont des articles formant de longs tubes occupant toute la longueur des entre-nœuds, et à membranes diversement épaissies. Les laticifères contiennent des matières grasses, un tannin, une substance résineuse.

Les tubes criblés sont remarquables par la diversité de leur structure et par leurs grandes dimensions. Leurs cloisons transverses sont horizontales ou obliques. Quand elles sont 60 horizontales elles constituent toujours un crible simple. Quand elles sont obliques le crible est tantôt simple, tantôt composé. Les parois longitudinales portent des cribles diversement groupés ; ou des ponctuations de grandeurs diverses ; ou à la fois des cribles et des ponctuations ; ou bien encore, un ensemble de cribles, de ponctuations et de fins pores isolés.

Les tubes criblés (*C. japonica*) ne contiennent pas de l'amidon, mais une substance amylacée rougissant sous l'influence de l'iode.

MARCEL MIRANDE,
Sur les Cuscutes monogynées.

Journal de Botanique, 1898.

POSITION DU SAC EMBRYONNAIRE DANS L'OVULE.

L'origine du sac embryonnaire a été étudiée d'une manière suffisamment complète par MM. WARMING, TREUB, STRASBURGER, MARSHALL WARD, GUIGNARD, HEGELMAIER pour qu'il soit inutile, pour le but poursuivi dans ce travail, d'y revenir.

On sait, d'autre part, que ce sac résorbe l'épiderme du nucelle et se trouve accolé contre la face interne du tégument.

Durant cette première phase le sac s'accroît, son sommet se prolonge en un bec occupé par les synergides ; sa partie moyenne se renfle, remplissant toute la cavité précédemment occupée par le nucelle, tandis que son pôle opposé tend à 10 s'allonger et à pénétrer dans les tissus de l'ovule.

On n'a généralement pas insisté sur la dimension du sac embryonnaire relativement au reste de l'ovule.

On n'a pas non plus tenu compte du rapport que présentent les tissus différenciés du tégument avec le sac embryonnaire.

Et pourtant ces différences de proportion sont intéressantes, tant pour caractériser le genre qu'au point de vue de la différenciation ultérieure.

La grandeur du sac embryonnaire par rapport au reste,

20 c'est-à-dire à l'ovule, varie d'un cas à l'autre. Quelquefois le sac occupe en longueur la moitié, et plus même, du tégument : ex. *Gaillardia*, *Dracopis amplexicaulis* ; d'autres fois il n'en occupe qu'une minime partie : Ex. *Serratula coronata Telekia*.

Entre ces deux extrêmes il y a tous les passages voulus : ainsi, dans les *Centaurea*, *Cacalia*, *Helianthus*, *Echinacea* et autres, le sac reste plutôt petit en comparaison avec les dimensions du tégument, tandis que dans les *Chrysanthemum*, *Cineraria*, *Senecio*, *Dahlia*, le sac embryonnaire occupe une partie notable de l'ovule.

30 Nous avons dit que ces dimensions étaient caractéristiques pour un seul et même genre. En effet, tous les *Centaurea* examinés (*C. montana*, *C. dealbata*, *C. Crocodylium*, *C. macrocephala*) possèdent un petit sac embryonnaire au sommet de l'ovule à tégument grand et bien développé.

Il en est de même pour les *Helianthus*, où les différentes espèces étudiées, à savoir : *H. Maximiliani*, *H. annuus*, *H. gryophyllus*, sont caractérisées par un petit sac et un gros tégument.

Deux espèces du genre *Scorzonera* (*hispanica* et *alpina*) ont
40 des sacs plus grands relativement aux téguments.

L'*Inula Helenium* présente un cas intéressant : à l'état jeune de l'ovule, mais à un moment où toutes les parties du sac embryonnaire sont distinctes, c'est-à-dire où l'on voit déjà les antipodes, les synergides, l'œuf et le noyau secondaire, les proportions du sac embryonnaire et du tégument ne présentent rien de particulier ; le sac occupe la moitié du tégument, les cellules épithéliales sont bien développées.

A un état plus avancé, l'ovule s'agrandit démesurément, ce qui ne paraît pas être le cas pour le sac embryonnaire. En
50 définitive, celui-ci paraît tout petit en comparaison du reste, et le tout rappelle comme aspect le genre *Telekia*. En même temps que se fait cet accroissement, il se produit des différenciations au point de vue de la structure anatomique de l'ovule et du sac embryonnaire. Nous reviendrons sur ces particularités en parlant des rapports entre la structure du sac et celle du tégument.

La structure de l'ovule présente des particularités qui méritent qu'on les étudie de plus près. Cet ovule se différencie, au moment où le sac embryonnaire se forme, en plusieurs régions distinctes qui passent les unes dans les autres. 60

Une région externe du tégument jouera plus tard le rôle de tégument de la graine ; une région plus interne, à cellules moins régulières, plus grandes, se différencie en même temps. Il ne faut pas la confondre avec la dernière couche du tégument, qui est l'épithélium du sac et dont il sera question plus loin.

La région dont nous parlons est un tissu interne qui entoure souvent le sac depuis la région micropylaire (*Inula Helenium*, *Senecio Doria*, *Telekia speciosa*, *Serratula coronata*) et arrive quelquefois jusqu'au sommet du sac. D'autres fois elle entoure surtout la région antipodiale et n'arrive que jusqu'à la moitié du 70 sac embryonnaire (*Galatella rigida*, *Catamanche lutea*).

Enfin on peut ne la trouver que vers la région antipodiale même (*Centaurea macrocephala*, *Cacalia hastata*).

Cette région est destinée à être digérée tôt ou tard par le sac embryonnaire, et on la voit alors qui se décompose et se résorbe peu à peu : les noyaux disparaissent ou diminuent ; les cloisons se résorbent, le contenu des cellules devient de moins en moins dense, bref, le tissu est mangé plus ou moins rapidement ; on ne saurait pas en désigner le moment exact, qui varie selon les cas et selon les espèces. 80

Chez les unes, au moment où le sac est formé, la région en question est fortement altérée (*Serratula*) ; d'autres fois elle persiste et ne paraît se résorber que plus tard.

Bien que ce tissu passe insensiblement dans la partie externe du tégument, il en est bien distinct au point de vue de sa composition chimique ; il ne se colore pas de la même manière.

Les colorants que nous avons employés pour nos préparations étaient l'aniline-safranine et le mélange de vert d'iode et de fuchsine. Or, la région en question se colore dans le premier cas en rouge plus intense que la partie externe, quand 90 elle est encore intacte, ou d'une manière moins vive quand elle est en voie d'altération.

En traitant les préparations avec le mélange fuchsine et vert

d'iode on observe un fait analogue : elle se colore en rouge ou en bleu selon que c'est la fuchsine qui l'emporte ou le vert d'iode.

La région épithéliale est celle que les différents auteurs ont nommée de noms différents, comme *endoderme*, *endothèle*, etc. C'est elle qui avoisine directement le sac embryonnaire et qui
100 s'étend depuis la région micropylaire jusqu'à la région antipodiale qu'elle ne dépasse guère.

Elle est constituée par des cellules variant comme forme, comme grandeur et comme disposition. Ces cellules sont le plus souvent serrées les unes contre les autres et sont remplies d'un protoplasma dense qui se colore vivement. Les noyaux de ces cellules sont souvent très gros et on en voit quelquefois plusieurs dans une seule et même cellule. Nous avons pu, en effet, observer parfois une division subséquente du noyau (*Helianthus*, *Maximiliani*, *Centaurea macrocephala*). Chez
110 cette dernière espèce on constate une division plus complète allant jusqu'à former presque un tissu épithélial.

Nous avons dit que ces cellules pouvaient varier de forme et de grandeur. On trouve, en effet, de grandes cellules tubulaires et régulières chez les *Leucanthemum lacustre*, *Gaillardia bicolor*, *Senecio Doria*, *Helianthus Maximiliani*, *Catamanche lutea*, de plus petites chez les *Chrysanthemum leucanthemum*, *Cineraria maritima* ; d'autres fois, ce sont des cellules, allongées, courbées, disposées en éventail vers le micropyle. Tel est le cas qui se présente pour les *Helianthus annuus*, *Serratula coronata*,
120 *Helianthus*, *gyrophyllus*, *Dahlia gracilis*. Dans ceux-ci l'irrégularité est plus marquée et les cellules qui avoisinent la région antipodiale sont plus petites que celles du côté opposé.

Dans d'autres espèces enfin, les cellules épithéliales sont plus petites, moins régulières comme forme, et présentent plutôt dans la préparation une apparence disjointe, comme si elles étaient plus ou moins dissociées.

MATHILDE GOLDFLUS.
Ovule des Composées.

Journal de Botanique, 1898.

Origine Exodermique des Poils Post-Staminaux des Sépales chez les Santalacées

Prenant ici les Santalacées dans un sens plus restreint que MM. Bentham et Hooker, on en sépare d'abord la tribu des Anthobolées et celles des Grubbiées, qui doivent constituer deux familles distinctes, puis les diverses espèces rapportées jusqu'ici au genre *Myzodendrum* et qui se répartissent entre quatre genres formant ensemble une famille autonome, les Myzodendracées, enfin les deux genres *Arjona* et *Quinchamalium*, composant aussi une famille à part, les Arionacées.

Ainsi limitées, les Santalacées ont toutes, comme on sait, un calice gamosépale concrescent avec le pistil dans une plus ou moins grande longueur, ce qui rend l'ovaire plus ou moins complètement infère. Après sa séparation, le tube du calice est tapissé par un disque, qui se prolonge souvent entre les sépales en autant de lobes alternes. Il n'y a pas de corolle. L'androcée se compose d'autant d'étamines que de sépales, superposées aux sépales et concrescentes avec eux dans une plus ou moins grande longueur. L'ovaire est uniloculaire dans toute sa hauteur, avec un placente central libre portant au-dessous du sommet autant d'ovules pendants qu'il y a de carpelles, ordinairement trois. Chaque ovule, dépourvu à la fois de nucelle et de tégument, se réduit à la foliole ovulaire, non différenciée ici en pétiole et limbe, tournant sa face dorsale en haut et en dehors, sa face ventrale en bas et en dedans. En un mot, ces plantes appartiennent au groupe des Innucellées, dont elles forment, pour ainsi dire, le noyau.

Ceci rappelé, la grande majorité des Santalacées produisent sur la face interne de chaque sépale, au-dessus du point où s'en sépare le filet staminal, derrière l'anthère par conséquent, un pinceau de longs poils dirigés de bas en haut et appliqués tout d'abord les uns contre les autres et tous ensemble contre la région supérieure du sépale. Ces poils post-staminaux des sépales sont bien connus des botanistes descripteurs. A. de Candolle, notamment, dans sa monographie des Santalacées

insérée au *Prodromus* en 1857, n'a pas manqué d'en signaler l'existence chez la plupart des genres de la famille. Ce qui a passé inaperçu jusqu'ici, c'est leur singulière origine, que la présente petite Note a pour objet de signaler à l'attention des anatomistes.

Tous les poils actuellement connus qui se développent sur la 40 tige, sur la feuille et sur les diverses parties de la fleur, lesquelles ne sont, comme on sait, que des feuilles différenciées, ont une origine toujours la même et facile à constater. Ils naissent d'autant de cellules de l'épiderme, qui sortent du rang en s'accroissant vers l'extérieur ; en un mot, ils sont épidermiques et exogènes.

Il n'en est pas tout à fait de même des poils qui se développent sur la racine et dont le rôle est si considérable, comme on sait, dans l'absorption de l'eau et des substances dissoutes. Il y a ici, à ne considérer que les Phanérogames, deux groupes à 50 distinguer. Chez les Climacorhizes, c'est-à-dire chez les Gymnospermes et les Dicotylédones, à l'exception des Nymphéacées, l'assise la plus interne de l'épiderme reste, après la chute des autres assises dans la coiffe, adhérente à l'écorce de la racine et développe ensuite ses cellules en poils ; ceux-ci sont donc encore épidermiques. Chez les Liorhizes, c'est-à-dire chez les Monocotylédones et les Nymphéacées, l'épiderme tombe tout entier dans la coiffe, en mettant à nu l'assise la plus externe de l'écorce, c'est-à-dire l'exoderme, qui développe ensuite ses cellules en poils ; ceux-ci sont donc d'origine exodermique. Mais dans les 60 deux cas, puisque, plus ou moins profonde au début, l'assise qui les produit se trouve devenue superficielle au moment où elle les forme, l'origine des poils de la racine peut être dite exogène, tout aussi bien que celle des poils de la tige et de la feuille.

Si donc, comme nous allons le montrer, les poils post-staminaux des sépales des Santalacées se trouvent avoir une origine endogène, il faudra convenir qu'ils diffèrent par là de tous les poils connus et qu'ils offrent, par conséquent, au point de vue de la Science générale, un certain intérêt.

70 Prenons pour exemple une de nos Santalacées indigènes les

plus communes, le *Thesium humifusum*, plante sur laquelle il est facile de suivre une à une, aux divers âges de la fleur, toutes les phases du phénomène.

Une coupe longitudinale médiane du sépale, pratiquée dans le jeune bouton, montre l'épiderme de la face interne continu depuis le départ du filet staminal jusqu'au sommet. Dans la plage située immédiatement au-dessus de l'insertion du filet, il est formé de cellules larges et plates ; plus haut et jusqu'à l'extrémité, il est constitué par des cellules étroites, prolongées en autant de papilles coniques. L'assise la plus externe de l'écorce, c'est-à-dire l'exoderme, offre aussi, dans ces deux régions, deux aspects différents. Sous l'épiderme hérissé de papilles qui recouvre presque tout le sépale, elle est formée de cellules étroites, allongées perpendiculairement à la surface, en forme de palissade. Sous l'épiderme plat et lisse qui revêt la plage post-staminale, ses cellules sont tout aussi hautes, mais beaucoup plus larges, ayant jusqu'à cinq ou six fois le diamètre des précédentes. Ce sont ces grosses cellules exodermiques qui se développent un peu plus tard en autant de poils.

A cet effet, sur sa face externe et sous la cloison supérieure, chacune d'elles pousse d'abord un prolongement. Ensemble, tous ces prolongements pressent sur l'épiderme, le soulèvent et en dissocient les cellules, qui tombent séparément ou par lambeaux. Après quoi, devenus extérieurs, ils s'allongent rapidement vers le haut en s'appliquant les uns contre les autres et se couchant ensemble sur l'épiderme papilleux et persistant de la région supérieure du sépale. Ils deviennent ainsi tout autant de poils, simples et unicellulaires, pleins d'un protoplasme abondant et granuleux, dont les bases renflées demeurent insérées côte à côte dans l'exoderme, et qui finalement se séparent, se rabattent et divergent en forme de pinceau derrière chaque anthère.

On a étudié, à ce point de vue, la plupart des genres de la famille ; partout, les poils post-staminaux des sépales ont la même forme, la même structure et aussi la même origine que dans les *Thesium*.

Les pinceaux de poils post-staminaux du calice des Santala-

cées sont donc d'origine endogène. Ils naissent dans l'exoderme et, pour paraître au dehors, exfolient l'épiderme dans toute la
110 région où ils se développent.

Par la position de leur disque, qui forme un bourrelet libre autour de la base du style, et par leur ovaire pluriloculaire dans sa région inférieure, les deux genres chiliens *Quinchamalium* et *Arjona* s'éloignent de toutes les Santalacées et doivent, comme il a été dit au début, former à côté d'elles une petite famille distincte, les Arionacées. Or les *Arjona* produisent sur la face interne de chacun de leurs sépales, au-dessus du départ de l'étamine et derrière l'anthère, un bouquet de gros poils, simples et unicellulaires, riche en protoplasme granuleux, tout
120 semblables par leur forme et par leur position à ceux des Santalacées. Mais pourtant l'origine en est bien différente. Comme les poils scléreux qui hérissent toute la face inférieure des sépales, les poils post-staminaux de l'*Arjona tuberosa*, par exemple, procèdent, en effet, du développement vers l'extérieur d'autant de cellules épidermiques plus larges que les autres. Ils sont donc exogènes, comme partout ailleurs. Cette différence s'ajoute à celle qu'on vient de signaler pour éloigner les Arionacées des Santalacées.

On sait aussi que les diverses espèces rattachées jusqu'ici au
130 genre *Schœpfia* et qu'il convient maintenant de répartir entre les trois genres *Codonium*, *Schœpfia* et *Schœpfiopsis* pour en former la famille des Schœpfiacées, possèdent sur la face interne de leurs sépales, au-dessus du départ de l'étamine et derrière l'anthère, un bouquet de gros poils, simples et unicellulaires, semblables de forme, de structure et de position à ceux des Santalacées et des Arionacées. Il est facile de s'assurer que l'origine de ces poils est ici épidermique, comme dans les *Arjona*, et non pas exodermique, comme dans les Santalacées.

L'origine exodermique des bouquets de poils post-staminaux
140 du calice des Santalacées n'est donc pas en relation directe et nécessaire avec leur forme, leur structure, leur localisation et leur fonction, puisque, dans les deux familles voisines des Arionacées et des Schœpfiacées, des pinceaux de poils tout semblables ont l'origine épidermique normale. Elle est bien plutôt

en rapport avec le groupe naturel où on la rencontre et doit, à ce titre, entrer désormais dans la définition même de la famille.

Les poils post-staminaux des Santalacées,

PH. VAN TIEGHEM.

Journal de Botanique, 1897.

PHÉNOMÈNES DE LA REPRODUCTION

FÉCONDATION.—Nous avons, dans l'organographie, mentionné sans explication l'action vivifiante du pollen sur les ovules contenues dans le pistil : nous allons maintenant entrer dans quelques détails sur cet acte merveilleux, qui domine toute la physiologie végétale.

Les Anciens avaient une idée confuse de la nature des étamines ; les Botanistes qui écrivirent après la Renaissance émirent sur ce sujet quelques conjectures vagues : ce ne fut que vers la vin du dix-septième siècle qu'on assigna d'une manière précise au pistil et à l'étamine leurs fonctions véritables. Tournefort refusa d'admettre la fécondation, et persista à ne voir dans les étamines que des organes d'excrétion. Après sa mort, le plus fervent de ses disciples, Sébastien Vaillant, dans un discours prononcé en 1716 au Jardin du Roi, démontra la nature physiologique des étamines, et appuya de preuves incontestables le phénomène de la fécondation dans les Végétaux. Grâce à ce monument littéraire, dont la date est certaine, c'est à la France que revient l'honneur de la découverte la plus importante qui eût été faite jusqu'alors en Botanique. Huit ans après, Linné acheva de populariser la doctrine de la fécondation par ses écrits, riches d'expériences, de logique et de poésie.

Nous nous contenterons de citer un petit nombre d'exemples qui prouvent la nécessité du pollen pour la formation de la graine. Le *Dattier* est un arbre dioïque, qui produit un fruit dont les Orientaux, en certaines contrées, font leur principale nourriture. Depuis un temps immémorial, ils suspendent des

panicules à fleurs mâles aux individus à fleurs femelles, et la fécondation s'opère toujours. Quand ces peuples se font la 30 guerre, ils vont détruire les *Dattiers* à étamines sur le terrain de leurs ennemis, afin de les affamer en rendant stériles les *Dattiers* à pistil.

Lorsque la pluie est abondante à l'époque de la floraison de la *Vigne*, les cultivateurs disent que la Vigne *coule*, c'est-à-dire que les pistils avortent, parce que, le pollen ayant été emporté, la fécondation n'a pas eu lieu.—Dans des contrées nouvellement découvertes de la mer du Sud, on a semé pour la première fois des *Cucurbitacées* dioïques; elles ont levé et produit des fleurs femelles; mais, les fleurs mâles manquant, la fécondation n'a 40 pas eu lieu.

Les Botanistes ont empêché et produit à volonté le phénomène de la fécondation, en retranchant les stigmates d'un pistil ou quelques-uns seulement: dans ce dernier cas, les ovaires correspondant à ces stigmates n'ont pas fructifié.

Un *Palmier* à pistil, cultivé dans les serres de Berlin, était stérile depuis quatre-vingts ans; on fit venir en poste du Jardin de Carlsruhe quelques pincées de pollen appartenant à un Palmier staminé, et l'arbre de Berlin fut fécondé; on le laissa ensuite stérile pendant dix-huit ans: après cet intervalle, il fut 50 encore fécondé artificiellement, et l'opération réussit comme la première fois.

Des expérimentateurs ont employé un autre moyen pour démontrer l'action physiologique de l'étamine: ils ont répandu le pollen d'une Espèce sur le stigmate d'une Espèce différente, mais appartenant au même Genre, et il en est résulté des individus qui participaient des deux Espèces. On nomme *hybrides* les Plantes provenant d'une fécondation croisée. Ces Plantes se développent assez bien en ce qui concerne les organes de la végétation; mais les organes de la reproduction 60 sont imparfaits, et les graines produites ne sont pas fertiles au-delà d'une ou de deux générations.

LE MAOUT ET DECAISNE.

Traité de Botanique.

DESCRIPTIONS FLORALES.

COMPOSÉES, *COMPOSITÆ.*

(COMPOSITÆ, SYNANTHERÆ.)

FLEURS *en capitule involucré.* COROLLE *épigyne, monopétale, isostémone, à préfloraison valvaire.* ANTHÈRES *syngénèses.* OVAIRE *uniloculaire, uniovulé.* OVULE *dressé anatrope.* EMBRYON *dicotylédoné, exalbuminé.*

PLANTES généralement vivaces, la plupart herbacées quelquefois sous-ligneuses, rarement arborescentes.—FEUILLES généralement alternes, souvent très découpées, rarement composées, privées de stipules, mais pourvues quelquefois d'oreillettes stipuliformes.—CAPITULES quelquefois pauciflores, très rarement uniflores, généralement multiflores, à inflorescence indéfinie, 10 mais constituant collectivement une inflorescence définie, en corymbe, ou en cyme, ou en glomérule, et composés de fleurs insérées sur un réceptacle commun (*clinanthe*).—CLINANTHE tantôt muni de bractéoles (*paillettes, écailles, soies, fimbrilles*); tantôt *nu*, soit *lisse*, soit ponctué de petites fossettes (*fovéoles*), soit creusé d'*alvéoles* à bord entier, ou denté, ou déchiqueté en languettes membraneuses, soit chargé d'aréoles pentagonales ceignant la base des fleurs.—INVOLUCRE (*péricline*) composé de bractées (*écailles, folioles*) plurisériées ou unisériées, quelquefois pourvu extérieurement de bractées accessoires (*calycule*).— 20 FLEURS ☿, ou ♀, ou ♂, ou neutres, tantôt toutes ☿ dans un même capitule; tantôt ♀, ou neutres à la périphérie du capitule, les intérieures ☿; tantôt ♂ au centre du capitule, et ♀ à la périphérie; capitules quelquefois exclusivement composés de fleurs ♀ ou de fleurs ♂, et alors *monoïques*, ou *dioïques.*—CALYCE rarement foliacé, généralement scarieux, ou membraneux, tantôt conformé en *godet*, tantôt évasé en *couronne* entière, ou denticulée, ou laciniée; tantôt divisé en *paillettes*, ou *dents*, ou *écailles*, ou *arêtes*; tantôt dégénéré en *poils* capillaires ou *soies*, *lisses*, ou *scabres*, ou *ciliés*, ou *plumeux*, et formant une *aigrette* soit *sessile*, 30

soit *stipitée*; tantôt enfin réduit à un mince bourrelet circulaire, ou même entièrement nul.—COROLLE épigyne, monopétale, tantôt régulière *tubuleuse*, 5-4-fide, ou 5-4-dentée, à préfloraison valvaire; tantôt irrégulière, soit *bilabiée*, soit *ligulée*; chaque lobe muni de deux nervures marginales, confluentes dans le tube. —ÉTAMINES 5-4, insérées sur la corolle, et alternant avec ses divisions. *Filets* fixés au bas du tube, libres supérieurement, rarement monadelphes, articulés vers le sommet. *Anthères* biloculaires, introrses, cohérentes en tube engaînant le style, très
40 rarement libres, ordinairement prolongées en appendice à leur sommet, souvent terminées en queue à la base de chaque loge. —OVAIRE infère, uniloculaire, uniovulé, couronné d'un disque annulaire qui entoure un nectaire concave. *Ovule* dressé, anatrope. *Style* filiforme, indivis dans les fleurs ♂, bifide dans les fleurs ♀ et les ☿; branches du style, communément nommées *stigmates*, à face dorsale convexe, à face interne plane, munies vers leur sommet, ou extérieurement, de poils courts et roides (*poils collecteurs*), et parcourues sur le rebord de leur face interne par deux étroites bandes glanduleuses (*glandules stigmatiques*)
50 constituant le véritable stigmate. Style beaucoup plus court que les étamines avant l'épanouissement de la fleur, mais grandissant rapidement à l'époque de la fécondation, montant dans le cylindre creux formé par les anthères, et enlevant, au moyen des poils collecteurs, le pollen destiné à féconder les fleurs voisines récemment épanouies. Fleurs ☿ pourvues de glandules stigmatiques et de poils collecteurs; les ♀ pourvues de glandules stigmatiques et privées de poils collecteurs; les ♂ pourvues de poils collecteurs et privées de glandules stigmatiques.—AKÈNE articulé sur le réceptacle commun, généralement sessile, muni
60 d'une aréole basilaire ou latérale, indiquant son point d'insertion, souvent prolongé en bec à son sommet.—GRAINE dressée.—EMBRYON droit, exalbuminé. *Cotylédons* plans-convexes, très rarement enroulés (*Robinsonia*). *Radicule* infère.

LABIÉES.

(VERTICILLATÆ, *Linné.*—LABIATÆ, *A.-L. De Jussieu* LAMIACEÆ, *Lindley.*)

COROLLE *hypogyne, monopétale, irrégulière, anisostémone, à préfloraison imbriquée.* ÉTAMINES 4, *didynames, ou* 2, *insérées sur la corolle.* OVAIRE 4-*lobé.* OVULES 4, *dressés, anatropes.* STYLE *gynobasique. Fruit se séparant en* 4 *akènes.* EMBRYON *dicotylédoné, exalbuminé.* RADICULE *infère.*—TIGE *tétragone.* FEUILLES *opposées, ou verticillées.*

TIGE herbacée ou sous-ligneuse, rarement ligneuse, ordinairement tétragone.—FEUILLES opposées, ou verticillées, à nervures pennées-réticulées, non stipulées.—FLEURS ☿, irrégulières, très rarement subrégulières (*Menthe*), naissant à l'aisselle des feuilles 10 ou des bractées, tantôt solitaires, ou géminées, tantôt réunies en glomérules, ou cymes à floraison centrifuge, qui forment, par leur réunion deux à deux, des faux-verticilles, espacés, ou rapprochés en épi. Feuilles, calyce, et même corolle et tige, souvent parsemées de glandes vésiculeuses contenant une huile volatile odorante.—CALYCE persistant, monosépale, tantôt irrégulier, à 2 lèvres, dont la supérieure représente 3 sépales, et l'inférieure 2; tantôt sub-régulier à 5 divisions, rarement 4 par l'absence de la supérieure.—COROLLE monopétale, insérée sur le réceptacle; *tube* quelquefois tordu (*Hyssopus lophantus, Ajuga orientalis*); 20 *limbe* 4-5-lobé, à préfloraison imbriquée-cochléaire, tantôt bilabié, la lèvre supérieure (*casque*) représentant 2 pétales et entière, ou échancrée, la lèvre inférieure représentant trois pétales et 3-lobée, quelquefois paraissant uni-labiée parce que la lèvre supérieure est fendue profondément et que ses lobes sont très courts (*Bugle*); tantôt s'évasant en cloche, ou en entonnoir, à 4 lobes presque égaux et portant des étamines presque égales (*Menthe*).—ÉTAMINES insérées sur le tube de la corolle, ordinairement 4, didynames, rarement 2, par avortement des 2 supérieures (*Cunile, Lycope, Sauge, Romarin*). *Anthères* à 2 30 loges, souvent confluentes au sommet, quelquefois séparées par

un connectif filiforme très développé (*Sauge*).—OVAIRE libre composé de 2 capelles, porté sur un disque épais, à 4 lobes ou loges, également distincts, ou cohérents par paires, 1-ovulés. *Ovules* dressés, anatropes, *Style* simple, naissant à la base des loges de l'ovaire et se dilatant en un gynobase qui tapisse le disque. *Stigmate* généralement bifide.—FRUIT se séparant en 4 parties qui figurent 4 akènes, ou 4 nucules, distinctes, ou géminées, à épicarpe quelquefois charnu (*Prasion*).—GRAINES
40 dressées.—EMBRYON droit, très rarement courbe (*Scutellaire*), exalbuminé, ou entouré d'un albumen charnu très mince. *Radicule* infère.

PRIMULACÉES.

COROLLE *monopétale, hypogyne, ou rarement périgyne, isostémone, à préfloraison tordue, ou imbriquée, très rarement nulle.* ÉTAMINES *opposées aux lobes de la corolle.* OVAIRE *libre, ou très rarement infère, 1-loculaire, à placentaire central globuleux, multi-ovulé.* OVULES *fixés par leur face ventrale.* FRUIT *capsulaire.* EMBRYON *dicotylédoné, albuminé.*—HERBES *à feuilles opposées, ou radicales.*

HERBES à rhizome ligneux, quelquefois tubéreux, très rarement sous-frutescentes.—TIGE généralement souterraine, raccourcie, à pedoncules non feuillés, quelquefois épigée et
10 feuillée. — FEUILLES poncturées de glandes, tantôt toutes radicales, ramassées ; tantôt caulinaires, opposées ou verticillées, très rarement alternes, non stipulées.—FLEURS ☿, régulières, très rarement sub-irrégulières, tantôt solitaires ou en ombelle au sommet d'un pédoncule scapiforme, tantôt solitaires, ou en grappe, à l'aisselle des feuilles, quelquefois en épi terminal.—CALYCE tubuleux, 5-fide ou 5-partit, rarement 4-6-7-fide.—COROLLE monopétale, rotacée, ou campanulée, ou infondibuliforme, ou quelquefois sub-bilabiée (*Coris*), très rarement 3-pétale (*Pelletiera*), très rarement nulle (*Glaux*).—ÉTAMINES insérées sur
20 le tube ou sur la gorge de la corolle, opposées à ses divisions, souvent alternant avec autant d'écailles pétaloïdes (? *staminodes*). *Filets* filiformes, ou subulés, ordinairement très courts. *Anthères* introrses, biloculaires, quelquefois dépassées par le *connectif*, et

s'ouvrant par 2 fentes longitudinales.—OVAIRE libre, ou très rarement enchâssé par la cupule réceptaculaire (*Samolus*), uniloculaire, à placentaire central ou basilaire, libre, globuleux, sessile, ou stipité, se continuant avec le tissu conducteur du style. *Ovules* nombreux, peltés, semi-anatropes, ou très rarement anatropes (*Hottonia*, *Samolus*). *Style* terminal, simple. *Stigmate* indivis.—CAPSULE 1-loculaire, s'ouvrant tantôt à son 30 sommet, ou dans toute sa longueur par des valves, ou des dents entières, ou bifides; tantôt par déhiscence transversale (*pyxide*). —GRAINES sessiles dans les fossettes du placentaire, à hile ventral, très rarement à hile basilaire.—EMBRYON droit, parallèle au hile, occupant l'axe d'un albumen charnu, ou sub-corné. *Cotylédons* demi-cylindriques. *Radicule* vague.

RENONCULACÉES.

(RANUNCULACEÆ, *Jussieu*.—PÆONIACEÆ ET RANUNCULACEÆ, *Bartling*.)

CALYCE *polysépale.* COROLLE *polypétale*, *hypogyne*, *régulière ou irrégulière*, *imbriquée*, *quelquefois nulle.* ÉTAMINES *nombreuses.* ANTHÈRES *adnées.* CARPELLES *généralement distincts.* FRUIT *akénien*, *ou folliculaire*, *rarement capsulaire*, *ou baccien.* GRAINES *dressées*, *ou inverses*, *ou horizontales.* EMBRYON *dicotylédoné*, *minime à la base d'un albumen ordinairement corné.*

PLANTES herbacées, rarement frutescentes (*Pæonia Moutan*), ou ligneuses grimpantes (*Clematis*). — FEUILLES radicales, alternes, ou rarement opposées (*Clematis*), à limbe disséqué, ou entier, à pétiole souvent dilaté-amplexicaule, ou rarement 10 muni d'appendices stipuliformes (*Thalictrum*, *Ranunculus*).— FLEURS ordinairement terminales, solitaires, ou en grappe, ou en panicule, généralement régulières, ou irrégulières (*Delphinium*, *Aconitum*), ☿, ou rarement dioïques par avortement (*Clematis*). —SÉPALES 3-∞, ordinairement 5, libres, rarement persistants (*Helleborus*, *Pæonia*), souvent pétaloïdes, généralement imbriqués,

quelquefois valvaires (*Clematis*).—PÉTALES en même nombre que les sépales, et alternes, ou en plus grand nombre (*Ficaria*, *Oxygraphis*, etc.), hypogynes, libres, onguiculés, imbriqués,
20 tombants, égaux, ou inégaux, de forme très variée, souvent nuls. —ÉTAMINES ordinairement nombreuses, plurisériées, hypogynes. *Filets* filiformes, libres. *Anthères* terminales, biloculaires, à loges adnées, extrorses, ou latérales.—CARPELLES plus ou moins nombreux, rarement solitaires (*Actæa*), libres, ou rarement cohérents (*Nigella*). *Style* simple. *Stigmate* situé au côté interne du sommet du style, ou sessile. *Ovules* anatropes, tantôt solitaires, ascendants, à raphé ventral, ou pendants, à raphé dorsal; tantôt nombreux, fixés à la suture ventrale, bisériés et horizontaux. — FRUIT composé tantôt d'akènes
30 mucronés, ou plumeux, tantôt de follicules libres, ou quelquefois soudés en capsule (*Nigella*), tantôt de baies uni-pauci-séminées (*Actæa*).—GRAINES dressées, ou inverses, ou horizontales; *testa* coriace dans les akènes, et à raphé peu proéminent; *testa* crustacé, ou charnu-fongueux dans les follicules, à raphé ordinairement très-proéminent et presque caronculé.—EMBRYON minime à la base d'un albumen corné, ou rarement charnu (*Pæonia*).

LE MAOUT ET DECAISNE.

Traité de Botanique.

GLOSSARY

N.B.—The figures refe: to the pages of the text.

A

abaissement, lowering, depression
aborder, to approach
aboucher, to tie up, bring together (193)
abriter, to shelter
accès, fit (67)
accident, consequence (in a bad sense)
accroissement, growth
s'accroître, to grow
achaine, achene (also *akène*)
acide acétylacétique, acetoacetic acid
acide azotique, nitric acid
acide azothydrique, hydrazoic acid
acide borique, boric acid
acide chlorhydrique, hydrochloric acid
acide fluorhydrique, hydrofluoric acid
acide hypoazotique, nitric peroxide
acide iodhydrique, hydriodic acid
acide molybdique, molybdic acid
acide rosolique, rosolic acid
acide sulfurique, sulphuric acid
acide sulfureuse, sulphurous acid
acide sulfurique fumant, fuming sulphuric acid. Nordhausen sulphuric acid (121)
acier, steel
acier boulonné, riveted steel (98)
acier graduellement trempé, slowly tempered steel
activer, to render active, to urge on, to push
actuel, of the present day, in use (92)
acuité, shrillness, pitch
s'adapter, to fit
adosser, to affix to the back
affinage, refining (151)
affiner, to work up, refine (151)
affleurement, grazing (15)
aigrette, pappus (308)
aigreur, cold-shortness, harshness of metals, brittleness
aiguille (de montre), (watch) hand
aigu, sharp, acute, keen
aimant, magnet, lode-stone
aimantation, magnetisation
aimanter, to magnetise
aire, area (3)
aisselle, axil (309)
ajutage à robinet, connecting tube furnished with a stop-cock (57)
alcalinoterreux (104), of the alkaline earths
alimenter, feed, supply (206)
alise, service fruit
alliage, alloy (124), mixture
allure, speed, pace (19), rate, trim, working of a furnace (106), behaviour (228)
altération, change (210) (usually for the worse); lesion (230), adulteration
alternatif, alternating
alterne, alternate
alumine, alumina
alun, alum
alun ammoniaque, ammonium alum
alun de potasse, potassium alum
alvéole, alveolus
amas, accumulation
amélioré, improved, perfected
amidon, starch
ammoniaque, ammonia, ammoniacal
amortir, to damp, deaden (34)
ampoule, blister, swelling, ampulla (277)
anatropé, anatropous
anche, reed
anche battante, beating reed
anche libre, free reed
Ancolie, Columbine
anesthésique, anæsthetic
anguillules, anguillulae (216)
anhiste, structureless (217)
anneau, ring
antérieur, previous, anterior
apaisement, settling down, ceasing of ebullition
aplati, flattened
appareil, machine, apparatus
appui, leaning, rest
arête, edge, bevel
arête vive, knife-edge (1)
argile, clay
arrondi, rounded
assise, layer (302)
astérie, starfish
astre, celestial body, star, planet, constellation, nebula, comet
au Bessemer, by the Bessemer converter, furnace
au-delà de, beyond
au-dessous, below
au-dessus, above

auge, trough
australe, southern
avance, start (116)
avoisiner, to be near
avorter, to abort, miscarry
axe, axis
azotate d'ammoniaque, ammonium nitrate
azotate de potasse, potassium nitrate
azote, nitrogen
azoté, nitrogenous
azoturie, azoturia (234).

B

baccien, berry-like
baie, berry
ballon, flask, retort
bande pelliculaire, endless film (79)
barbelure, barbel, barbule (272)
bas, low
base, base, basis
basilaire, basilar
battage, driving (127)
battre en brèche, to smash to pieces
baudruche, goldbeaters' skin
béant, open, yawning, gaping
bélier, ram
bénéfice, profit
bioxyde de manganèse, manganese peroxyde
biseau, wedge
blanc mat, dull white
blanchiment, bleaching
bleuet, cornflower
bobine, reel, coil (78, 95)
bois de sapin, deal
boréal, northern
borne (95), terminal
boucher, to cork
bouchon, cork
bouclier, shield
bougie, candle, candle-power
bouillonnement, ebullition, bubbling
boulonné, bolted, riveted
bourgeon, bud
bourrelet, ring, ridge (304)
(*se*) *boursoufler*, to swell, froth
boussole, compass
bouton, bud
boyau, bowel, tube
bractée, bract
branchie, gill
branle (*mettre en*), to toll, to set going, oscillate
brasque, dust
brasque de charbon de bois, ground charcoal (102)
brasser, to work, stir up, brace (in puddling) (159)
brevet, patent
brome, bromine
bromure, bromide
bronchique, bronchial
broyage, crushing (120)
brûlure, burn
brut, rough, gross
buffet d'orgue, organ
bulbe, medulla oblongata (209, 222)
bulle, bubble
but, goal, end.

C

cadavérique, post mortem (adj.)
cadre, frame
caillette, fourth stomach of a young calf (190)
caillot, clot
cal, callus, callosity (295)
calcul, calculus
calotte, cap (277)
calyx, calyx
capitule, capitulum
capsules surrénales, supra-renal bodies
capuchon (*en*), hooded (268)
Capucine Tropæolum ('Nasturtium')
carbonate de baryte, barium carbonate
carbonate de chaux, carbonate of lime
carbure de fer, carbide of iron
carbure d'hydrogène, hydrocarbon
carène, keel
carré, square
carton, cardboard, card
casque, galea (309)
cassant, brittle
caulinaire, cauline
ceignant, surrounding, encircling
cellule, cell
cémentation, cementation, converting
cendre, ash
cerveau, brain
cervelet, cerebellum (222)
chalumeau, blow-pipe
chambre noire, camera obscura, dark room
champ, field, current (96)
champ partiellement redressé, partially commutated current (96)
champ tournant, rotary field (96)
charbon de bois, wood charcoal
charbon de cornue, retort carbon, gas carbon
charnu, fleshy
charnu-fongueux, fleshy-fungoid (312)
chaudière, boiler

chaux, lime
chaux sodée, soda-lime
cheval de force, horse-power
cheval-vapeur, horse-power
chevelu, hairy
chlore, chlorine
chlorurer (76) chlorise
chlorure, chloride
chlorure de chaux, chloride of lime
chlorure d'éthylène, ethylene dichloride
chrome, chromium
chute, fall
cicatrice, scar
cliché, dry-plate, negative
cliver, to cleave
cloche, bell, bell-glass
cloison, wall, partition, septum, cell-wall
clos, sealed
cobaye, guinea-pig
coiffe, (root-) cap (302)
coiffer, to cover
col, neck
colonnes à plateaux, Lunge's tower, a tower with perforated shelves (118)
comporter, to give rise to, carry with (149)
composante, component
concolore, of the same colour
concours, co-operation, meeting
concours (*point de*), point of intersection
concurrence, rivalry, competition
condensateur monté en dérivation, condensor in a derived circuit or shunt circuit
conduit auditif, auditory canal (33)
(*se*) *confondre avec*, to coincide with (1)
connectif, connective
conque, external ear, concha
constater, to determine, find
contenance, load, contents, burden
coordonnée, co-ordinate
coquille, shell
coquelourde des blés, corn-cockle
cor, horn
corindon, corundum
cornée, cornea
cornéen, corneal
cornet, cone, cornet (271)
cornouiller, dogwood
cornue, retort
cornues (*charbon de*), retort carbon, gas carbon
corps de pompe, pump barrel (7)
corps vitré, vitreous body
côte, rib
couche, layer (11)
coulée, running off, tapping (155)
couler, to go off (306)
courant, current
courant d'air, draught
courant redressé, commutated current
courbe, curve
courbure, curve
couronne, crown, corona
course, stroke (17)
couteau, knife, knife-edge (1)
couvercle, lid
creuset, crucible (152)
creux, hollow
crible, sieve, sieve-tube
cristal, glass, flint-glass, rock-crystal, quartz-crystal
critique, criticism
croisement, intersection
croître, to grow, wax, increase
cuisson, baking, burning, cooking
culture, cultivation
curviligne, curvilinear
cuve, trough
cycle fermé, closed cycle.

D

dard, jet, flame (77)
dauphinelle, larkspur
débouché, outlet
décalage, lag
décalque, proof, counter-proof, exposure
décaper, to cleanse (41)
décarburer, to decarburate
déchet, waste product (220)
déchiqueté, ragged (273)
déchirement, tearing
décime, decinormal
déclenchement, throwing out of gear (127)
déclencher, to throw out of gear (128)
déclic, apparatus for disengaging, monkey (127)
déclic (*sonnette à*), pile-driver with pincers (128)
(*se*) *décomprimer*, to regain its volume (62)
découpé, cut up
découpure, incision (270)
décrassage, raking, cleaning, scumming (155)
décroître, to grow small, wane
dédoublement, doubling
défalquer, to deduct
défrayer, to afford a theme for (41)
dégagement, liberation
dégager, to give out, disengage, evolve
dégelé, thawed
(*au*) *départ*, at the start

dépasser, to exceed
déplacement, displacement
dérangement, disturbance
dérivation, shunt (95)
déroulement, unrolling
désagrégation, breaking up
désormais, henceforth
détente, expansion (57)
dialyseur, dialyser (192)
dicline, diclinous
dicrote, dicrotous (195)
dioïque, dioecious
discordance, disagreement
disjonction, disjunction, independence (283)
disponible, available (189)
disposé, arranged
disposer, to arrange
dispositif, arrangement (115), apparatus
disposition, arrangement
dissolvant, solvent
dolomie, basic lining
donné, given
données, data (22)
dosage, estimation, titration
dose, quantity (152)
doser, to dose, ascertain the quantity of the ingredients of a given compound, give the fluxes, estimate (153)
doublé, lined
douves, staves (277)
dressé, erect, commutated
droit, right (angle)
droite (*une*), straight line
duvet, down.

E

ébranlement, disturbance, (2) shaking
écaille, scale, shell
écartement, opening, widening, stretching
échancré, notched
échantillon, sample, specimen
échauffement, heating, heat acquired
échelle, scale (15)
éclairement, illumination (82, 84)
éclat, brightness (84)
écorce, bark, cortex
écorce cérébrale, cerebral cortex (207)
écoulement, discharge of a liquid
écran, screen
écroui, hammered (12)
(*s'*)*écrouir*, to become compressed (61)
efficace, effective, efficient
effort, power, work, pressure (6)
élevé, high
emboîter, to insert, encase
embouchure, mouth-piece (26)
emmagasiner, to store
emploi, use
emprunter, to borrow
en grand, on a large scale
enceinte, enclosure
encéphale, brain
enchâsser, to encase, frame
enchevêtré, tangled (188)
enclavé, locked
enclenchement, clasping, putting into gear
enclume, anvil
enduit, coating
enfumé, smoked
engendrer, to generate
engrais, manure
énoncé, enunciation, formulation
(*s'*)*ensuit que*, it follows that
entonnoir, funnel
entraîner, to imply (129)
entraver, to hinder, retard
entre-nœud, internode (266)
environ, about, approximately
épaisseur, thickness
épaississement, thickening
(*s'*)*épancher*, pour out (189)
(*s'*)*épanouir*, to open (267)
épanouissement, opening (of a flower) (267)
éperon, spur
épi, ear, spike
épigé, above ground (294)
épine, thorn, spine
épineux, spinous, thorny
épinière, spinal
épreuve, proof, test
épuisement, exhaustion
épuiser, to exhaust
épuré, purified, rectified (85)
épurer, to purify, make clear
équilibre indifférent, neutral equilibrium (1)
étain, tin
étalé, spread out, displayed
étalon, standard
étamé, tinned, silvered
étamine, stamen
état, state
étendard, standard
étendue, area, extent
étirer, to draw out
étoupe (*boîte à*), stuffing-box
exfolient, exfoliate (304)
expérience, experiment
expérimentation, series of experiments.

F

fabrique, manufacture, manufactory
faible, weak, small, poor
faire défaut, to be absent
faisceau, sheaf, bundle, pencil of light (65)
fait, fact
fausse-cloison, false septum (281)
faute de, through lack of (19)
fécondation, fertilisation
fécondation croisée, cross-fertilisation
fecondé, fertilised
féconder, to fertilise
féculent, starchy
fendu, split, cloven
fer ondulé, corrugated iron
fermeture, closing
feuille, leaf
feuillet, layer (275)
fil, wire, thread
filet, filament, thread, network, plexus (203)
filet d'étamine, filament of a stamen (269)
filet sympathique, sympathetic plexus (232)
fini, finite (244)
flacon, bottle, flask
fléau, beam
fleuraison, flowering
floconneux, cloudy, flocculent
fluorure, fluoride
foie, liver
fonctionnant en demi-grand, working on a moderate scale (119)
fond, bottom, background
fondre, to melt
fonte, pig-iron, forge-pig, cast-iron
fonte manganisée, spiegeleisen
fonte miroitante, spiegeleisen
force élastique de la vapeur, vapour tension, pressure of a gas
force vive, kinetic energy, vis viva (46)
fossette, foveolum, dimple
four, oven, furnace; *allure d'un* —, working or pace of a furnace
fourneau (*haut*), blast furnace
foyer, focus, source of light (84)
foyer de chaleur, hottest place in a furnace (49)
frais, expense
frange, fringe, band
frottement, rubbing, friction
fusée, rocket.

G

gamme, scale
gangue, gangue
gâteau, cake
gaz d'eau, water-gas
gaz d'éclairage, coal-gas
gaz de houille, coal-gas
gelée, frozen, frost
gazogène, gas-producer (110)
géode, geode, potato-stone, a hollow nodule lined with crystals
gisement, beds, deposits (109)
glace, ice
glace pilée, pounded ice
gland, acorn
globule, corpuscle
glycosurie, glycosuria
godet, cup (268)
gorge, throat
gousse, pod, legume (288), shell, husk, clove
gouttelette, drop
gouvernail, rudder
grâce à, thanks to, owing to
graine, grain, seed
graisse, fat
graisseuse, fatty
grillage, roasting (112)
grille, grate
grossier, coarse.

H

happer, to snatch, catch
hélice, screw, propeller
hêtre, beech
houblon, hop
houille, stone-coal, pit-coal, coal
huile, oil
hydratation, hydration
hydrate de chaux, calcium hydrate, slaked lime
hydrogèle, hydrogel (224)
hypogé, subterranean (295).

I

impair, odd
impropre, unsuitable, unfit
incolore, colourless
inconvénient, drawback
indications continues, continuous registration, continuous reading (4)
indice, index, trace
inducteur feuilleté, laminated inductor (96)
induit, armature (95)
induit fermé, closed circuit armature (96)
insensible, imperceptible
insolation, exposure to the sun (78)
insuffler, to blow in
intégrant, integrating
iode, iodine

iodure, iodide
iodure d'argent, iodide of silver
iodure de mercure, mercuric iodide
isolement, isolation, insulation
isoler, to insulate
isomère, isomeric
isthme, leaf-stalk, petiole
ivresse, intoxication (221).

J

jaune-brun, yellowish brown
jeu, play, working, action (17)
jeu du registre, adjustment of the damper
jour, light
juste, close-fitting.

L

lacinié, laciniate
lacune, space
lacune aérienne, air-space
laiton, brass
lame, sheet, blade, lamina, layer (9)
lamelle, sheet, lamina
lamelle de sulfate double d'uranium et de potassium, crystalline scales of potassium uranium sulphate (169)
laminé tube, drawn, weldless tube (118)
languette, tongue
largeur, width
lenteur, slowness
lentille, lens
lever, rise, raising
levier, lever
lèvre, lip, labium
liaison, bond, union, connection, restraint (128)
liège, cork
lieu (avoir), to take place (41)
limbe, blade, limb
lime, file
lingot, ingot
lingotière, ingot mould, ingot casting mould (156)
lisse, smooth (276)
loge, cell (267)
loge anthérique, anther-cell
loi du point triple, law of the triple point
loupe, lens, magnifying glass
loupe de Brücke=B.'s doublet (217)
lunette grossissante, magnifying glass.
lunette de Rochon, dichroiscope (73).

M

maille, mesh
machine à vapeur, steam-engine
machine pneumatique, air-pump
maintien, maintenance (21)
malaxer, to grind, pound (185)
mamelon, boss
mamelonné, covered with bosses, multituberculate (276)
maniement, handling, working
manivelle, handle, crank
marasme, marasmus
marche, progress, motion, working
marteau, hammer
marteau pilon, block-hammer, ram
massif, solid
massue, club
mauve, mallow
mèche, wick
mélange, mixture
mélange réfrigérant, freezing mixture
mélange titré, titrated mixture, standard solution
ménisque, meniscus
mesure, measure, measurement
à mesure que, as
mettre en branle, to toll (of a bell), to set going
milieu, middle, centre, medium
milliard=1,000,000,000, one thousand millions
minerai, ore
mise de fonds, outlay
mise en jeu, starting of a machine
mise en œuvre, utilisation (117), exploitation
mobile, movable (1), movable body (4)
moelle, medulla, marrow
moelle allongée, medulla oblongata (208)
molène, mullein
molybdate d'ammonium, ammonium molybdate
monoïque, monœcious
moulage, moulding (for casting) (155)
moulé, moulded
mouron, chickweed, stellaria
mousse, froth, foam, scum (183)
mousse de platine, spongy platinum (122)
mousser, to froth, foam
moût, must (183)
mouton de sonnette, rammer, rammer-log, monkey, ram-block of a pile-driver
moyen, mean
moyenne, mean, average
mufle, muzzle
muflier, snapdragon (290)
muqueuse, mucous membrane
mûrir, to ripen.

N

nappe sanguine, blood-flow
nèfle, medlar

nerf vague, vagus nerve (196)
nervure, veins, veining
nervure médiane, midrib
neutre, neutral
nid, nest, matrix
niellé (*blé*), bunt, smut, black-rust
niveau, level
nœud, knot, node (26)
noir animal, animal charcoal (121)
noir de fumée, soot, lamp-black
noyau, nut, kernel, nucleus
nucelle, nucellus (297)
nuisible, harmful.

O

obturateur, screening, screen, stop
occidentale, western
occlus, concealed
œil nu, naked eye
oiseau à essor, soaring bird
oligiste, hæmatite, ferric oxide (102)
onde, wave
ondée sanguine, blood-flow
onglet, claw
onguiculé, unguiculate
optima, optimum
ordonnée, ordinate
oreille moyenne, middle ear (34)
oreillette, auricle (193)
orientale, eastern
orme, elm
osciller, vary (22)
osselet, ossicle
osseux, bony
ouate, wadding, cotton-wool
ouïe, sense of hearing
ourlet, rim, selvage, border
ovaire, ovary
oxycarbure de nickel, nickel carbonyl
oxydant, oxydising
oxyde de carbone, carbon monoxide
oxyde de cuivre, cupric oxide
oxyhydrique, oxyhydrogen.

paillette, palea, scale (272)
panneau, flap (276)
paroi, wall, septum, partition (6)
particulier, special, peculiar
pâteux, pasty, viscous
(*au*) *pas*, walking
pqvillon, bell of a wind instrument
pavillon, vestibule (of the ear) (33)
pellicule, skin, coat, pellicle, film
pelte, peltate
pentane, pentane
perchlorure de fer, perchloride of iron
perfectionnement, improvement
perte, loss
perturbation, disturbance
pesée, weighing
petit rouge, dull red heat. See under *rouge*
petite bière, table beer (184)
peu profond, shallow
phtaléine du phénol, phenol-phthaleïn
physicien, physicist
pieu, pile, stake (127)
pile, battery (206)
pinceau, brush
placentaire, placenta
plage, area (303)
plan, plane
plancher fixe, fixed plate
plaque, plate, sheet
plasma sanguin, blood plasma (188)
platine, s.f. plate, platen, s.m. platinum
platine écroui, hammered platinum
platine-platine rhodié, platinum against platinum-rhodium alloy
plein, pregnant, full
pli, fold
plomb, lead
plombate calcique, plumbate of lime
plumeux, feathery
poche de coulée, casting-ladle (155)
poil, hair
polynome, multinomial (253)
polyurie, polyuria
pompe aspirante, suction pump (7)
pompe foulante, force pump (7)
ponctuation, dot (297)
porté au rouge, heated, red hot
portée, bearing, range
portée restreinte, limited bearing (119)
porte-vent, air-channel
porte-voix, speaking-trumpet
pose, exposure
postulatum, postulate
pouce, inch, thumb
poumon, lung
pourper, purslave
poussière, dust
pouvoir, power
pratique, practice
pression, pressure (6)
pression sanguine, blood-pressure
présure, rennet (191)
prétendre=assert, maintain (248)
procédé, process
proprement dit, properly so-called
propriété, property
propulseur, propeller
protoplasma, protoplasm
protoxyde d'azote, nitrous oxide
provenant, produced from (113

provenir, to be the result of
puddlage, puddling (152).

Q

quadrijumeau, quadrigeminal
queue, tail.

R

racines antérieures, anterior or ventral roots
radicule, radicle
raffinage, refining (151)
raison, ratio, proportion
ralentissement, slackening
ramassé, squat, depressed (310)
rameau, stem, branch (278)
ramener, to reduce
rapport, proportion, ratio (7), relation
rapport inverse, inverse ratio
par rapport à, with reference to
rasé, shaved, grazed
rate, spleen
rayer, to scratch
rayon, radius, ray
rayonnant, radiating
rayonnement, radiation (170)
réactif, reagent
réagir, to re-act
réagissant, re-acting
recherche, research
recherché, sought after
récipient, receiver
réducteur, reducing
réfléchi, reflected
refouler, to thrust back
refringence, refractivity
réfringent, refracting, refractive
refroidissement, cooling
régistre, damper, register
rein, kidney
rémige, remige, flying quill (19)
rendement, output (92)
renflement, swelling
(*se*) *repartissant sur*, distributed over (4)
repos, rest, state of rest
réseau, network (112), reticulum (277)
ressort, spring
restreint, restricted, narrow
retard, retardation
retassement, re-sucking, re-settling
rétréci, shrunk
réveil, awakening
revient, recovery of a metal by tempering, tempering
rhomboèdre, rhombohedron
ridé, furrowed, wrinkled
rigole, groove (278)
robinet, tap, stop-cock
rosée, dew
rouage, system of wheels (81)
rouge blanc, white heat (104)
rouge orangé, dull red heat (103)
rouge vif, bright red heat
rouge-vineux, wine-red.

S

sacré, sacral
saillie, projection
saillie (*faire*), to project
sain, sound, healthy, flawless (153)
salicaire, purple loosestrife
sarcode, sarcode, protoplasm
saupoudré, dusted
savoir, namely, that is, *à* —, namely
scellé, sealed
scinder, to cleave, divide
sciure de bois, sawdust
scories, scoria, waste, ashes, cinder, slag (155)
(*se*) *scorifier*, form a slag (153)
sein (*au* — *de*), in the centre of, in the heart of
sel gemme, rock salt
sel marin, sea-salt
sens, direction (6)
sensibilité, sensitiveness
sensible, sensitive, perceptible
serpentin, worm, condenser (of a still) (182)
siccatif, drying
sifflet, whistle
signaler, to call attention to
sillon, furrow, suture
soie, seta, bristle (307)
soigné, careful
soit, let — be
soit . . . soit, either . . . or
sole, hearth, bottom, slag-bottom, dead plate of a furnace
solidaire, connected rigidly (9)
sollicité par, acted on by
sommité évasée, wide-open top
sonnette à déclic, pile-driving engine with pincers
soude, soda
soudure, soldering, fusion, joint
soufflerie, bellows
soufflure, flaw, blow-hole (168)
soufre, sulphur
souiller, to flaw, soil, spoil
soupape de sûreté, safety valve
sourdre, to well up
sous-acétate de plomb, baric or sub-acetate of lead
sous-clavière, sub-clavian

sous-ligneuse, sub-ligneous
sous-produit, by-product
soustraire, to remove from (4), subtract
spath d'Islande, Iceland spar
spire, convolution or turn of a spiral (260)
subcorné, subcorneous (311)
subir, to undergo
subéreux, corky, suberous
suc, juice
sucre, sugar
sucré, sweet
suivant, in the direction of
sulfate de chaux hydraté, gypsum, hydrated calcium sulphate
sulfure, sulphide
sulfure de potassium, sulphide of potassium
surbaissé, depressed (283)
surchauffé, superheated, heated beyond the normal
surrénal, suprarenal
sus-hépatiques, superhepatic
sustentation, support.

T

tableau, table
tache, spot
taille, size, cut
tamis, sieve (107)
taré (filtre), tared or weighed filter-paper (184)
tassement, sucking, sinking, subsiding
tasser, to pile up, smear
(*se*) *tasser*, to crumble by its own weight
tâtonnement, experiment, successive trial (7)
tâtonner, to experiment
tégument, integument, epidermis
température du blanc naissant, temperature at which red heat becomes white heat
teneur, yield
tenir à, to depend upon
tension élevée, high tension
tentative, attempt
térébenthine, turpentine
terme, period, end, stage (122)
ternir, to become dull, tarnish
tiers, third
tige, stem
tige divisée, graduated stem
titrer, to titrate
tonicité, tonic condition, tonicity (223)
tour, circuit
tour, turn
tournant, rotating (95)
toxicité, poisonousness
trait, feature, line, stroke
trait d'union, bond
tranche, section, slice, stratum
trancher sur, to show up against (295)
transformateur, transformer (92)
transvasement, transference of liquid from one vessel to another
travail moteur, work employed (8)
travail utile, work utilised (8)
trempe, hardening, temper
trijumeau, trigeminal
trompe d'Eustache, Eustachian tube
tronçon, segment
tubes criblés, sieve-tubes (295)
tuyau, tube, pipe
tuyau à anche, reed-tube, reed-pipe
tympan, drum, tympanum.

U

uni, smooth
unir, to unite, make smooth
unité, unit
urée, urea,
use, worn out
usine, factory
usine d'affinage, refining works.

V

valeur, value, result
valvaire, valvular
végétal, plant
veine cave, vena cava (193)
ventre, belly, loop (26), ventral segment
vernis, varnish
vessie, bladder
vide, vacuum
vide (faire le), to exhaust, create a vacuum
vierge, free (90)
vinasse, residue, vinasse, wash (183)
virgule, comma, decimal point
vis à filet interrompu, screw with interrupted thread (7)
viser, to aim
vitesse, velocity, speed
voie, process
voie humide, wet way (97)
voie ignée, heating or melting process, method of high temperature (97)
voie sèche, dry way (97)
voile, sail
voilure, wing surface, sail area
voisin de (être), to approximate
vol, flight
vol plané, hovering or soaring flight (19)
vol ramé, active flight (19)
à volonté, at will, ad lib.
vouer, to devote.

Lectures et Conversations Françaises. A Reader for Middle and Upper Forms, composed of subjects forming a suitable basis for French conversation. With Oral Exercises containing *Questionnaires, Grammaire, Exercises, Dictée.* With a Map of France and a Plan of Paris. *By* W. G. HARTOG, B.A. Lond. *Crown 8vo.* 2*s.* 6*d.*

In use at Clifton, Tonbridge, Marlborough, Cambridge, Edinburgh, Manchester, St. Andrews, Hull, Salisbury, Bristol, Glasgow, Halifax, Leeds, Exeter, Worcester, Epsom, Bangor, etc.; and recommended by the London County Council in the Inspection for Modern Languages conducted by the University of London.

Pages Choisies des Grands Écrivains. A more advanced book for French reading and conversation, on the same plan as 'Lectures et Conversations.' *By* W. G. HARTOG, B.A. *Crown 8vo.* 1*s.* 6*d.*

Grammaire Française Pratique basée sur la Méthode Inductive. With Exercises throughout. *By* W. G. HARTOG, B.A. Lond. *Crown 8vo.* 3*s.* 6*d.* Part I., forming a complete Elementary Grammar, may be had separately. 2*s.* 6*d.*

This Grammar is written entirely in French, and is an attempt to carry out the theory that grammar should be taught by example and not by precept.

'Mr. Hartog's "Grammaire Française" is a model of what to copy. . . . It is to books like this we must look for raising the standard of French in England.'—*Saturday Review.*

A Book of Easy Oral (or Written) French Prose Composition. Designed to follow Part I. of 'Grammaire Française.' *By* W. G. HARTOG, B.A. *Crown 8vo.* 1*s.*

Rivingtons' New Junior French Texts. On the Direct Method. Edited with Notes and Oral Exercises, **both in French,** Passages for Re-translation, *Questionnaires*, and Vocabularies. *Small Fcap. 8vo. With Illustrations.* 6 *Vols.* *Each* 1*s.*

1. Histoire de la Princesse Rosette (La Comtesse de Ségur).
2. Mateo Falcone and L'Enlèvement de la Redoute (Prosper Mérimée).
3. Contes de Fées choisis (Mme. Le Prince de Beaumont).
4. A Selection from La Fontaine's Fables.
5. Histoire d'Ali Baba (Antoine Galland).
6. Histoire d'un Chien (Mme. de Witt) and Le Vilain petit Canard (Hans Andersen).

Rivingtons' New Intermediate French Texts. On the Direct Method. With Notes and Oral Exercises, **both in French,** Passages for Re-translation, and *Questionnaires.* *Small Fcap. 8vo. With Illustrations.* 6 *Vols.* *Each* 1*s.*

1. Croisilles et Poèmes choisis (A. de Musset).
2. Sinbad le Marin (Antoine Galland).
3. Les Jumeaux de l'Hôtel Corneille (E. About).
4. Tamango and Le Coup de Pistolet (Prosper Mérimée).
5. Les quatre Talismans (Nodier).
6. Un Episode de Guerre (Henri Beyle-Stendhal).

[Continued on next page.

Rivingtons' Illustrated French Comedies for Schools. Edited with Notes and Oral Exercises both in French, *Questionnaire*, Exercises, and Passages for Retranslation based on the text. *Small Fcap. 8vo. With Illustrations.* 6 *Vols. Each* 1*s.*

1. Le Voyage de Monsieur Perrichon (E. Labiche and E. Martin).
2. Le Baron de Fourchevif (E. Labiche and A. Jolly).
3. La Joie fait Peur (Mme. de Girardin).
4. Valérie (E. Scribe).
5. Le Major Cravachon (Labiche, Lefranc, and Jessé).
6. Le Diplomate (Scribe).

Lectures Scientifiques. A French Reader for Science Students. Containing extracts from modern French Scientific Works in Chemistry, Physics, Mathematics, Physiology, and Botany. With a Glossary of Technical Terms. *By* W. G. HARTOG, B.A. Lond. *Crown 8vo.* 5*s.*

Duhamel and Minssen's Complete Course of French Prose Composition.

In use at Eton, Harrow, Winchester, Charterhouse, Cheltenham, Wellington, Repton, Oxford, Cambridge, Canterbury, Liverpool, Reigate, Edinburgh, Birmingham, Leeds, Portsmouth, Hull, Carlisle, Dundee, Bangor, Eastbourne, Tiverton, Newark, Rugby, Tonbridge, Dover, Bath, Liverpool, Nottingham, Belfast, Tavistock, Dublin, Glasgow, Aberystwyth, Shrewsbury, Bradford, Bristol, Bath, Bedford, Hertford, Swansea, Guernsey, etc.

First Steps in French Reading and Composition. *By* J. DUHAMEL, M.-ès-A. *Crown 8vo.* 3*s.* 6*d.*

A Primer of French Prose Composition. Including an Elementary Syntax, the Irregular Verbs, 150 Easy Pieces for Translation, and a complete Vocabulary. *By* J. DUHAMEL, M.-ès-A.; *and* B. MINSSEN, M.-ès-A., *Assistant Master at Harrow School.* *Crown 8vo.* 2*s.* 6*d.*

A Book of French Prose Composition for Middle Forms. Including Notes on Syntax, the Irregular Verbs, numerous Idioms and Phrases, and 150 Pieces for Translation. *By* J. DUHAMEL *and* B. MINSSEN. *Crown 8vo.* 3*s.* 6*d.*

Advanced French Prose Composition. With Notes on Syntax, Translation, and Idiom, followed by Exercises with Notes and lists of selected words. *By* J. DUHAMEL, M.-ès-A. *Crown 8vo.* 4*s.* 6*d.* *net.*

Elementary Latin Prose Exercises. By HILLARD and BOTTING. 3s. 6d.

Elementary Latin Translation. By HILLARD and BOTTING. 2s. 9d.

Latin Prose Composition for Middle Forms. By NORTH and HILLARD. 4s. 6d.

Additional Latin Exercises. By HILLARD and BOTTING. 3s.

Initia Latina. By E. D. MANSFIELD. 2s. 6d.

Exercises in Latin Prose. By E. D. MANSFIELD. 3s. 6d.

Continuous Latin Prose Composition. By H. J. DAKERS. 5s. 6d.

Junior Latin Prose Composition. By H. J. DAKERS. 4s. 6d.

First Latin Translation Book. By TURNER and THOMAS. 2s. 6d.

Beginner's Guide to Latin, being a First Latin Translation Book. By G. G. LOANE. 2s. 9d.

First Lessons in Latin Grammar. By W. GREENSTOCK. 3s. 6d.

Latin Lessons for Beginners. By A. R. S. HALLIDIE. 2s.

First Latin Lessons. / **Second Latin Lessons.** C. M. DIX. Bk. I. 3s. 6d. II. 3s.

First Latin Book. / **Second Latin Book.** C. A. WILLIAMS. Bk. I. 3s. 6d.; II. 3s.

Rivingtons' Class Books of Latin Unseens. (*a*) 5 Books for Middle Forms, and (*b*) 3 Books for Upper Forms. 9d. each.
Easy Latin Unseens. In Three Books. Prose and Verse together:—
Book I. 9d.; Book II. 9d.
Book III., Verse only. 9d.

A Latin Verse Book. For Junior Students. By A. H. THOMAS. 4s.

Latin Elegiac Verse Composition. By R. MELDRUM. 5s.

Elementary Latin Elegiac Verse Composition. By R. MELDRUM. 2s. 6d.

Rivingtons' Graded First Latin Books. Five cheap books for beginners. I. 1s. 3d., II., III., IV., V. 1s. 6d. each.

Single Term Latin Readers.
First Term. Two Books. 10d. each.
Second Term. Three Books. 1s. 3d. each.
Third Term. Three Books. 1s. 3d. each.
Fourth Term. Two Books. 1s. 6d. each.
Fifth Term. Two Books. 1s. 6d. each.
Sixth Term. Two Books. 1s. each.

Single Term Greek Readers. 1s. 4d. each.
First Term. Two Books.
Second Term. Two Books.
Third Term. One Book

A Primer of Greek Grammar. By E. ABBOTT and E. D. MANSFIELD. 4s., or separately:—Accidence. 3s.

A Primer of Greek Exercises. By W. GREENSTOCK. 4s.

Elementary Greek Exercises. By HILLARD and BOTTING. 3s. 6d.

Greek Prose Composition. By NORTH and HILLARD. 4s. 6d.

A First Greek Reading Book. By ARTHUR SIDGWICK. 3s.

Greek Sentence Construction. By ARTHUR SIDGWICK. 1s. 9d.

A Primary History of England. By Mrs. RANSOME. 1s. 4d.

A First History of England. By Mrs. RANSOME. 3s.

An Elementary History of England. By C. RANSOME. 1 Vol., 2s.; or in 3 Parts, 9d. each, in paper cover:— I. To 1485. II. 1486-1688. III. 1689-1914.

The Story of England. By W. S. ROBINSON.
Part I. Early Times to 1272. 2s. 6d.
Part II. 1272 to 1603. 2s. 6d.
Parts I. and II. in 1 Vol. 4s.
Part III. 1603 to 1760. 2s. 6d.
Part IV. 1760 to 1921. 3s.
Parts III. and IV. in 1 Vol. 4s. 6d.

A Short British History. By W. S. ROBINSON.
One Vol. 3s. 6d. Or two Periods, 2s. each.
Period I. To Elizabeth, 1603.
Period II. To George V., 1921.

A Junior British History. By R. L. GIVEEN and F. W. BEWSHER. 1 Vol. 3s. 6d., or in 2 Parts:— I. To 1603. 1s. 9d. II. To 1914. 2s.

Notes on British History. By W. EDWARDS. I. To 1485. 3s. II. To 1660. 3s. III. To 1783. 3s. IV. To 1901. 5s.
Parts I.-IV., in 1 Vol. 12s. 6d.

Junior British History Notes. By W. EDWARDS. Parts I., II., III., 2s. each. Part IV., 2s. 6d.

Junior School British History. By A. D. INNES. 3s.

An Illustrated History of England. By W. S. ROBINSON. One Vol., 5s.; or Two Parts. 3s. each. I. To 1660. II. To 1914.

An Outline of British History. By A. D. INNES. 5s.

A Class Book of English History. By A. HASSALL. 1 Vol., 6s.; or 2 Parts. 3s. 6d. each. I. To 1603. II. To 1921.

British History. From the Earliest Times. By L. CECIL SMITH.
One Vol., 6s. ; or Two Periods :—
I. To 1485. 3s. II. To 1921. 4s.

An Advanced History of England.
By C. RANSOME. 1 Vol., 9s.
Or in Two Parts, 5s. each :—
I. To 1603. II. To 1914.

General Political History from the Earliest Times. By A. D. INNES.
One Vol., 4s., or Two Parts, 2s. 6d. each :—
I. To 1470. II. To 1904.

A History of England and the British Empire. By A. D. INNES.
In Four Vols., 8s. 6d. each :—
Vol. I. To 1485. II., 1485-1688.
III., 1689-1802. IV., 1802-1922.

England's Industrial Development: A Historical Survey.
By A. D. INNES. 6s.

A Short History of Rome.
By W. S. ROBINSON. 4s. 6d.

A History of Rome. For Middle and Upper Forms. By J. L. MYRES. 6s.

A Short History of Greece.
By W. S. ROBINSON. 4s. 6d.

By Canon WHITHAM.

Selections from the Old Testament.
Bible Text only, 1 Vol., 3s. ; or Two Parts, 1s. 9d. each.

Old Testament History.
1 Vol., 6s. ; or 2 Parts, 3s. each.

Short Old Testament History.
1 Vol., 3s. ; or 2 Parts, 1s. 9d. each.

The Life of our Blessed Lord.
From the Text of the R.V. With Notes, 4s.
Also 'The Life of our Lord,' the Bible Text only, as a Narrative. 2s. 6d.

The New Testament for Schools.
The Text of the Revised Version with Introductions and Notes.
St. Matthew's Gospel. 3s.
St. Mark's Gospel. 2s. 6d.
St. Luke's Gospel. 3s.
The Acts of the Apostles.
Part I. i.-xv. 2s. 6d. II. xvi.-end, 2s. 6d.

Short New Testament History.
1 Vol., 3s. ; or 2 Parts, 1s. 9d. each.

By Canon GLAZEBROOK.

Bible Lessons for the Young.
The Old Testament in selection from the A.V., 3s. ; or 2 Parts, 1s. 6d. each.

Notes and Outlines for Bible Lessons. For Teachers. 5s.

Bible Lessons and Notes and Outlines. Also in 1 Vol. 8s.

By Canon GLAZEBROOK.

Lessons from the Old Testament.
The Text of the Bible. ***Selected.***
Senior Course—Text and Notes, in 2 Vols., 4s. 6d. each. Text only, 3s. each Vol.
Junior Course—Text, Notes, 1 Vol., 4s. 6d.
Text only, without Notes, 3s. 6d.
Or in Three Parts, 1s. 6d. each :—
Part I. The Creation to the Settlement of the Tribes.
II. The Judges to the time of Solomon.
III. Jeroboam to the Dedication of the Temple.

Edited by Dr. A. E. HILLARD.

Rivingtons' Books of the Bible.
Genesis and Exodus, 2s. 6d. each. Joshua and Judges, 2s. each. Ruth and I. Samuel—II. Samuel—I. Kings—II. Kings, 2s. 6d. each. Ezra and Nehemiah—Amos, 2s. each. St. Matthew's Gospel, 2s. 6d. St. Mark's Gospel, 2s. St. Luke's Gospel, 2s. 6d. St. John's Gospel, 2s. The Acts, 2s. 6d.

A Continuous Narrative of the Life of Christ. 3s.

By W. G. BORCHARDT.

Practical Arithmetic for Schools.
5s. 6d. ; or in Two Parts, 3s. each.
A Key Complete, 15s. net.
Or in Two Parts, 7s. 6d. each net.
Examples only, in Two Parts, 2s. 6d. each.

Junior Practical Arithmetic. 2s. 6d.
Examples only, 2s.

Arithmetical Types and Examples.
5s. Examples only, 3s. 6d.

Junior Arithmetic. 2s. 6d.
Examples only, 2s.

Revision Papers in Arithmetic.
2s. 6d.

Elementary Algebra. 5s. 6d.
Or Part I. 3s. 6d. Part II. 3s.
Key, 15s. net; in 2 Parts, 7s. 6d. each net.
Examples only, 3s. 6d. ; or Two Parts, 2s. 6d. each.

Revision Papers in Algebra. 2s. 6d.

Junior Algebra. 3s. 6d.
Examples only. 3s.

School Mechanics. I. Statics. 7s. 6d.
II. Dynamics. 7s. 6d. ; or two Parts, 4s. each.

Plane Geometry for Schools.
By T. A. BECKETT and F. E. ROBINSON.
In Two Parts, 5s. each.

A School Geometry.
By CHAMPION and LANE. 5s.

Elementary Calculus.
By C. H. P. MAYO. 10s.